

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

О. Г. Попова, С. М. Пургіна, Д. О. Попов

**АВІАЦІЙНЕ
ЕЛЕКТРОРАДІОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2016

УДК 620.22: 629.7.002.3:(076.5)
ББК 50.5 Я 73
П 57

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук В. І. Луценко,
канд. техн. наук, доц. Н. О. Лалазарова

Попова, О. Г.

П 57 Авіаційне електрорадіоматеріалознавство [Текст]: навч. посіб./
О. Г. Попова, С. М. Пургіна, Д. О. Попов. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т
ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2016. – 84 с.

ISBN 978-966-662-462-1

Досліджено структуру і властивості провідникових, напівпровідникових, діелектричних і магнітних матеріалів. Наведено основні дані про методи вимірювання і принципи дії пристроїв. Подано методичні рекомендації щодо проведення експериментів, оброблення результатів дослідження і контрольні запитання, що охоплюють обсяг матеріалу відповідно до програми курсу «Електрорадіоматеріалознавство».

Для студентів радіотехнічних спеціальностей.

Іл. 33. Табл. 16. Бібліогр.: 4 назви

УДК 620.22: 629.7.002.3: (076.5)
ББК 50.5 Я 73

© Попова О. Г., Пургіна С. М., Попов Д. О., 2016
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2016

ISBN 978-966-662-462-1

Лабораторна робота № 1

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Мета роботи

1. Ознайомитися з процесом кристалізації.
2. Вивчити основні фактори, що впливають на процес кристалізації.

Загальна інформація

Кристалізація – процес переходу речовини з рідкого стану в твердий, при якому формується кристалічна решітка. При цьому речовина переходить у термодинамічно стійкий стан з меншим запасом вільної енергії.

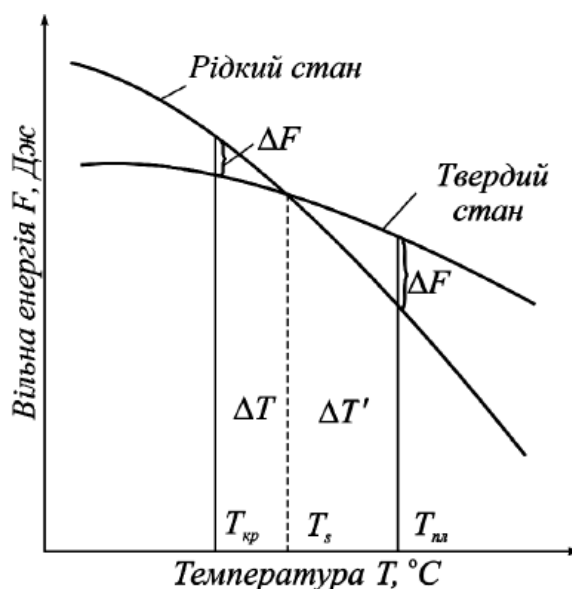


Рис. 1.1. Графік зміни вільної енергії рідкого і твердого станів залежно від температури

Температура, при якій вільні енергії рідкого і твердого стану дорівнюють одна одній, називається рівноважною або теоретичною температурою кристалізації. При T_s кристалізація відбуватися не може. Для початку кристалізаційного процесу необхідно, щоб процес був термодинамічно вигідний системі. Це можливо тільки при охолодженні рідини нижче T_s .

Фактична температура кристалізації – температура, при якій практично починається процес кристалізації. Різниця між T_s і T_k називається ступенем переохолодження:

$$\Delta T = T_s - T_k. \quad (1.1)$$

Процес кристалізації складається з двох елементарних процесів: зародження центрів кристалізації та зростання кристалів. Швидкість процесу

кристалізації визначається швидкістю зародження і швидкістю росту.

Швидкістю зародження називається кількість кристалів, що утворилися в одиниці об'єму за одиницю часу, її розмірність – $1/\text{мм}^3 \cdot \text{с}$.

Швидкістю їх зростання називається швидкість збільшення лінійних розмірів зростаючої грані кристала в одиницю часу, її розмірність – $\text{мм}/\text{с}$.

Швидкість кристалізації залежить від ступеня переохолодження.

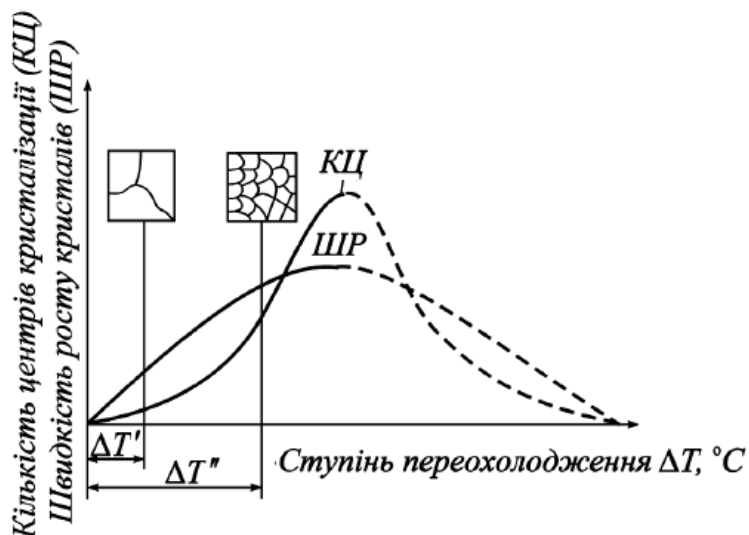


Рис. 1.2. Вплив ступеня переохолодження на число центрів кристалізації (КЦ) і швидкість росту кристалів (ШР)

При невеликому ступені переохолодження $\Delta T'$ швидкості утворення центрів кристалізації і росту незначні, тому процес кристалізації протікає повільно і зерна виходять великі (оскільки утворюється мало центрів кристалізації в одиниці об'єму).

Для ступеня кристалізації $\Delta T''$ значно збільшилися швидкості зародження центрів кристалізації і швидкість їх росту. З цієї причини процес кристалізації буде протікати значно швидше, ніж при ступені переохолодження $\Delta T'$, а оскільки при цьому збільшується число центрів кристалізації в одиниці об'єму, виходять дрібні зерна.

Таким чином, змінюючи ступінь переохолодження, можна отримати зерна різної величини. Від величини зерна залежать багато властивостей сплаву.

На швидкість кристалізації впливають також хімічний склад, наявність модифікаторів, які є центрами кристалізації.

Порядок виконання роботи

У цій роботі процес кристалізації спостерігається на прикладі пересичених водних розчинів солей: NaCl , NH_4Cl , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Для отри-

мання пересиченого розчину солі розчиняють у воді при температурі 80 - 90°C.

Потім на предметне скло за допомогою піпетки наносять краплю гарячого пересиченого розчину солі й охолоджують до кімнатної температури. При цьому в розчині виділяються кристали певної форми, тобто протікає процес кристалізації, який спостерігається за допомогою мікроскопа.

1. Простежити під мікроскопом процес кристалізації кожного розчину солі.
2. Замалювати кілька кристалів кожної солі.
3. Підрахувати середню кількість (N_{cp}) кристалів NaCl на одиниці площі при різній швидкості охолодження: 1°C/с, 7°C/с, 10°C/с.
4. Побудувати залежність N_{cp} від швидкості охолодження.
5. Визначити середню величину діагоналі H_{cp} кристалів NaCl (з 10 - 15 вимірювань) при різній швидкості охолодження.
6. Побудувати залежність H_{cp} від швидкості охолодження.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Фізична сутність процесу кристалізації.
3. Малюнки кристалів.
4. Таблиці вимірювань кількості й розмірів кристалів NaCl при різній швидкості охолодження.
5. Залежності середньої кількості кристалів NaCl на одиниці площі та їхнього середнього лінійного розміру від швидкості охолодження.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. У чому фізична суть процесу кристалізації?
2. Рушійна сила процесу кристалізації.
3. Які чинники визначають розмір і форму кристалів?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ

Мета роботи

1. Вивчити суть, можливості й методику виконання макроструктурного аналізу.
2. Придбати знання та навички у приготуванні макрошліфів і прове-

денні макроструктурного аналізу.

Загальна інформація

Макроструктурний аналіз – це дослідження напівфабрикатів або готових виробів з метою виявлення дефектів структури або особливостей будови неозброєним оком, за допомогою лупи або інструментального мікроскопа (при невеликому збільшенні – до 30-кратного).

Для макроструктурного аналізу використовують переріз деталей або їхні фрагменти. Зразок деталі або її елемент, спеціально вирізаний і приготований для аналізу (пилянням і шліфуванням), називають *макрошлифом*.

Існує два види макроаналізу: без застосування травлення та із застосуванням спеціальних реактивів-травильників.

Без попереднього травлення можуть бути виявлені такі дефекти або особливості структури:

- поверхневі (тріщини, шлакові раковини);
- внутрішні (газові бульбашки, усадкові раковини, великі непровари у зварних з'єднаннях);
- вид, характер і попередні причини зламів.

Характеристика основних видів зламів

В'язке руйнування має матовий відтінок без яскраво вираженого металевого блиску. Зразок або деталь перед руйнуванням набуває значної місцевої пластичної деформації, що супроводжується утворенням шийки. Циліндричні зразки в місці утворення шийки мають, як правило, зону відриву в центральній частині та зону ковзання у вигляді чаші у периферійній частині.

Матеріал з в'язким руйнуванням забезпечує більшу надійність конструкції. При руйнуванні в'язкого матеріалу потрібна витрата значної роботи. В місцях концентрації напруг внаслідок локальної мікродеформації матеріал зміцнюється і руйнування уникається або відбувається при більш високих напругах.

Крихке руйнування характеризується незначною роботою руйнування, що витрачається тільки на пружну деформацію. Теоретично такого роду руйнування можуть відбуватися при напругах, значно більших меж текучості (для ідеальних кристалів, що не містять концентраторів напружень). У реальних умовах, за наявності в металах дефектів кристалічної будови, концентраторів напружень, несприятливого поєднання температурно-швидкісних факторів навантаження, крихкі руйнування можуть спостерігатися при напругах, що дорівнюють $0,7 \sigma_s$ (межі текучості), а іноді й при $0,4 \dots 0,5 \sigma_s$. Крихкі руйнування відбуваються без помітної пластичної деформації шляхом відриву або відколу.

Поверхня зламу орієнтована перпендикулярно максимальним розтягальним напруженням. Злам має кристалічний характер і металічний блиск. Руйнування може відбуватися по тілу зерен (транскристалічний злам) або по межах зерен (міжкристалічний злам).

Втомне руйнування є причиною близько 30 - 90% усіх авіаційних аварій. Воно розвивається під дією розтягальних напружень при знакозмінних навантаженнях.

Злам має дві зони. Перша зона – зародження і поступове поширення тріщини з гладкими притертими стінками, причому руйнування починається від яскраво вираженого фокуса. Друга зона – остаточне крихке руйнування. Поверхня зламу має кристалічну шорстку структуру. Оскільки втомні руйнування спостерігаються в площині, нормальній до прикладених навантажень, то всі причини, що сприяють утворенню або збільшенню дефектів на поверхні (низька чистота поверхні, наявність концентраторів напружень, тертя, монотонний або циклічний нагрів), викликають зниження втомної міцності.

Дослідження макроструктури матеріалів із застосуванням травлення

Для дослідження застосовують поверхневе і глибоке травлення. *Поверхневе травлення* не створює рельєфу і супроводжується фарбуванням окремих зон з різною інтенсивністю. Його застосовують для дослідження макрошліфів, в яких спостерігається різка різномірність у хімічному складі або структурі.

При травленні треба чітко витримувати три параметра: концентрацію реактиву, час травлення і температуру. Температура травлення – кімнатна, час – 10 - 100 с, реактиви – відносно слабкі (для сталей – 5%-й розчин HNO_3 , CuCl_2 , для алюмінієвих сплавів – 10%-й розчин NaOH).

Поверхневим травленням макрошліфів виявляють:

- хімічну неоднорідність на перетинах зварних швів, на перетинах деталей, поверхневий шар яких підданий дифузійному насиченню різними елементами: вуглецем (цементация), азотом (азотування) та інше;

- структурну неоднорідність (на макрошліфах, які мають зварні шви, поверхневе загартування та інше);

- величину зерна макроструктури (в тих випадках, коли зерно дуже велике і може бути розглянуто неозброєним оком, наприклад, при неоднорідній пластичній деформації і подальшій рекристалізації алюмінієвих та інших сплавів);

- газову пористість злитків або литих деталей.

У мікроелектроніці поверхневе травлення необхідне для визначення глибини залягання *p-n*-переходу в напівпровідниках.

Глибоке травлення, яке створює на поверхні мікрорельєф, застосовується для деталей і макрошліфів з однорідною структурою (лиття, ковані

деталі). Час травлення – до двох годин, температура травлення – 80 - 100°C, реактиви концентровані.

Глибоким травленням макрошліфів виявляють:

– структуру злитків і кованих деталей (розмір і напрямок дендритних (деревовидних) первинних кристалів та інше);

– волокнистість в будові металів і сплавів, яка найчастіше з'являється в результаті витяжки (розкочування) домішок і неметалевих включень.

У мікроелектроніці глибоке травлення застосовують для травлення ділянок інтегральних мікросхем, які не захищені шаром фоторезиста. Вибір травильника залежить від хімічних властивостей матеріалу, який розчиняють (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Травильники, які найчастіше використовуються

Матеріал макрошліфа	Травильник	Швидкість травлення, мкм/хв	Температура травлення, °С
Al	$\text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_3\text{COOH}$	0,33	60
SiO_2	$\text{HF} + \text{N}_4\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$	0,66	20
Ni-Cr	$\text{HCl} + \text{HNO}_3$	–	20

Визначення наявності сірки в сталях

Виконуючи відбиток на фотопапері за методом Баумана, можна встановити розподіл сірки в сталях. У місцях скупчення неметалевих включень (сірки) залишаються темні точки на фотопапері. За допомогою цього методу можна зробити якісний аналіз розподілу сірки і визначити, де розташовується місце скупчення сірки і яка її відносна кількість (багато, мало). Його застосовують для контролю технологічного процесу виробництва напівфабрикатів та вибіркового контролю якості готових деталей.

Виявлені хімічні та структурні неоднорідності будови металу і сплаву, наявність волокнистої будови і неметалевих включень істотно впливають на фізико-механічні властивості матеріалу, а також на величину питомого опору, температурний коефіцієнт, коерцитивну силу (для магнітних матеріалів).

Завдання

1. Вивчити види зламів. Користуючись комплектом зламів, плакатами та фотографіями, ознайомитися з різними зламами, дати їх характеристику і зробити замалюнки.

2. Визначити структурну або хімічну неоднорідність у цементованих деталях або в деталях з поверхневим загартуванням.

Макрошліф зачищають наждачною шкіркою, протирають сухою ганчіркою і опускають у реактив або протрують ваткою за допомогою пінцета

протягом 10 - 20 с. Найчастіше застосовують такі реактиви: 5%-й розчин HNO_3 або 10%-й розчин персульфату амонія $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$. Після травлення, поки шліфи мокрі, запам'ятати і відразу ж зобразити структуру. Вказати у звіті назву деталі, марку сталі, товщину і природу шару, режим травлення і реактив. Дати висновок про якість деталі.

Якщо необхідно зберегти результати аналізу деталі, її промивають, швидко просушують і покривають лаком.

3. Дослідити структуру і якість зварних з'єднань.

Макрошліф зачистити і протруїти реактивом, що складається з суміші CuCl_2 і NH_4Cl . Мідь, відновлена залізом, покриває поверхню шліфа. У тих місцях, де мідне покриття має меншу щільність або несучільне (рихлість, мікротріщини, газові бульбашки), хлористий амоній краще проникає у поверхневий шар мікрошліфа та інтенсивніше протравлює зони дефектів. Шліф змити ватним тампоном, зробити висновок про вид і якість зварного з'єднання.

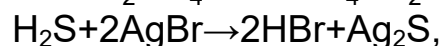
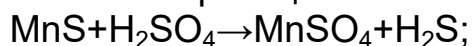
Зобразити зовнішній вигляд макрошліфа, який протруїли, описати тип зварного з'єднання за способом оброблення крайок (V-, X-, T-образні, зварювання встик та інше), записати розміри зони термічного впливу (якщо вона виявлена), дати висновок про якість зварного з'єднання.

4. Провести аналіз зернистої будови ливарного алюмінієвого сплаву. Приготувати макрошліф, обробити реактивом для поверхневого травлення, замалювати ескіз деталі з крупнозернистою структурою, вказати максимальний розмір зерен, дати висновок про якість деталі.

5. Встановити волокнистість будівлі в деталях, отриманих штампуванням або виготовлених механічною обробкою. Підготувати макрошліф, обробити (сталі – 10%-м розчином $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, алюмінієві сплави 10%-м розчином NaOH у воді), накреслити схему розподілу волокон, записати назву деталі. Дати висновок про спосіб виробництва і якість деталі (якість деталі вважається незадовільною, якщо волокно підходить близько до поверхні або виходить на неї, а також, якщо волокно дуже яскраво виражено).

6. Визначити наявність і розподіл сірки в сталевій деталі.

Зачистити, протерти (промийти) і встановити макрошліфи на фотопіпр, який попередньо змочили 5%-м розчином сірчаної кислоти. Тримати в притиснутому стані 2 - 3 хв. Між матеріалом макрошліфа, сірчаною кислотою і фотопапером протікають такі реакції:



де MnS – включення в сталі; AgBr – бромисте срібло фотопаперу; Ag_2S – забарвлене в коричневий колір з'єднання, яке на фотопапері повторює геометрію, розподіл та інтенсивність включень сірки. Виявлення сірки на фотопапері називається *методом відбитка за Бауманом*.

Відбитки замалювати, записати назву деталей, дати характеристику включень сірки: а) багато чи мало; б) дрібні чи великі; в) розподіл вклю-

чень по перерізу деталі – рівномірне, нерівномірне і т. д. Дати висновок про якість деталей.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Суть макроструктурного аналізу.
3. Замальовки і аналіз макроструктури:
 - видів зламів, хімічної та структурної неоднорідності;
 - зварного з'єднання;
 - зернистої будови сплаву;
 - наявності текстури;
 - змісту і розподілу сірки.
4. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що являє собою макроструктурний аналіз металів і сплавів?
2. Які особливості будови і структури виявляються при макроструктурному аналізі?
3. Які ви знаєте види руйнувань, чим вони характеризуються?
4. Чим характеризується поверхнєве травлення і для чого воно використовується? Для чого використовується глибоке травлення?
5. Як визначають наявність і розподіл сірки у сталях методом відбитка за Бауманом?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ

Мета роботи

1. Ознайомитись з суттю, можливостями й методикою виконання мікроструктурного аналізу.
2. Придбати знання та навички в приготуванні мікрошліфів і проведенні мікроструктурного аналізу.
3. Виконати мікроструктурний аналіз зразків матеріалів: визначити величину зерна, бал неметалевих включень, товщину дифузійного шару, наявність мікродфектів.

Загальна інформація

Мікроструктурний аналіз полягає в дослідженні будови (структури)

металів і сплавів за допомогою оптичних металографічних мікроскопів із збільшенням від 50 до 1500 разів або за допомогою електронних мікроскопів зі значними збільшеннями.

За допомогою мікроаналізу можна визначити такі особливості структури:

- 1) тип і бал неметалічних включень у сплавах;
- 2) величину і форму зерен;
- 3) розмір, форму і розташування структурних складових (карбідів, графітових включень та інше);
- 4) мікрodefекти металу або сплаву (тріщини, раковини);
- 5) глибину і структуру поверхневих шарів (після хіміко-термічної обробки, поверхневого загартування тощо).

Мікроскопічний аналіз включає в себе приготування мікрошліфів і дослідження їх за допомогою металографічного мікроскопа.

Мікрошліфом називається зразок металу або сплаву, поверхня якого спеціально підготовлена для мікроаналізу:

1. *Вирізка зразка*. Проводиться на верстаті або ножівкою із застосуванням рясного охолодження, щоб уникнути нагрівання зразка (нагрів може змінити структуру). Зручні зразки діаметром 10–12 мм і висотою 7–8 мм або прямокутні зразки з підставою 12x12 мм і висотою 10 мм. Зразки невеликого перерізу (дріт, листи та інше) монтують заливкою у спеціальні оправки або в струбцини.

2. *Шліфування*. Виконується вручну або на стінках з послідовним застосуванням шліфувальних шкурочок різної зернистості. Починають шліфування самою грубою шкіркою і закінчують найтоншою. З переходом від однієї поверхні до іншої напрямком шліфування змінюють на 90°. Потім шліф ретельно промивають водою і полірують.

3. *Полірування*. Здійснюється на полірувальних верстатах з обертовими колами, обтягнутими фетром або сукном. На коло ллють водну суспензію оксиду хрому, алюмінію або магнію. Відполірований шліф промивають водою і спиртом, а потім просушують фільтрувальним папером або струменем теплого повітря. Щоб захистити поверхню від окислення, зразки зберігають в ексікаторі з хлористим кальцієм. Добре відполірований шліф має дзеркальну поверхню.

Безпосередньо після полірування при мікроструктурному аналізі можна виявити наявність і розподіл у металі або сплаві неметалевих включень (сульфідів, оксидів та інше). Вони не відбивають променів світла і їх видно в полі зору мікроскопа у вигляді темних крапок або плям різної величини і форми. Металева основа мікрошліфа являє однорідне світле поле. Неметалеві включення суттєво впливають на механічні властивості металів і сплавів. Як правило, збільшуються твердість і міцність матеріалу і зменшується відносне подовження. Крім того, неметалеві включення впливають на електропровідність металів і сплавів: чим більше число включень, тим гірше матеріал проводить електричний струм.

4. *Травлення.* Застосовується для виявлення зернистої, полікристалічної будови матеріалу. Травлення виконують за допомогою розчинів кислот, лугів і солей.

Структура металу виявляється тільки після травлення мікрошліфа спеціальним реактивом. При травленні неоднорідні ділянки металу або сплаву стають видимими під мікроскопом. Сутність процесу виявлення структури металу або сплаву травленням полягає у різного ступеня взаємодії (розчинення або фарбування) окремих структурних складових. Границі зерен, як правило, травляться сильніше унаслідок їх хімічної неоднорідності й виразно виявляються під мікроскопом (рис. 3.1).

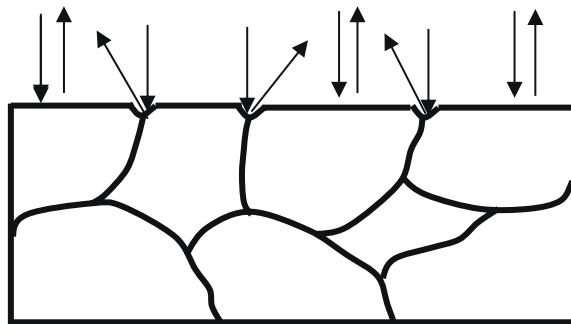


Рис. 3.1. Схема отримання зображення мікрошліфа після травлення

Промені світла, відбиті від похилих поверхонь канавок на межах зерен, розсіюються і не потрапляють у поле зору, тому границі зерен видно на мікрошліфі у вигляді темних ліній.

Плоскі ділянки зерен добре відбивають світло і залишаються світлими. Різні структурні складові травляться на різну глибину і добре виявляються після травлення.

Травлення здійснюють зануренням шліфа в реактив на певний час (5 - 60 с). Ознакою протруєння є потьмяніння поверхні. Після травлення мікрошліф промивають водою, протирають ватою, змоченою спиртом, а потім просушують, прикладаючи фільтрувальний папір або злегка протираючи сухою ватою. В результаті травлення має бути чітке виявлення мікроструктури. Якщо структура недостатньо виявлена, шліф трують повторно. Якщо структура виходить занадто темна, то в цьому випадку шліф треба знову відполірувати і протравити, зменшивши час травлення або послабивши концентрацію реактиву.

Для прискорення полірування і полегшення травлення останнім часом застосовують електрополірування і електротравлення. Деякі реактиви, які використовуються для травлення мікрошліфів, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Реактиви для травлення сталей, чавунів і сплавів кольорових металів

Найменування реактиву	Склад реактиву	Призначення реактиву
Спиртовий розчин азотної кислоти	3–5 см ³ HNO ₃ на 100 см ³ етилового спирту	Вуглецеві й середньо-леговані сталі й чавуни
Соляно-кислий розчин хлорного заліза	10 г FeCl ₃ на 25 см ³ HCl і 100 см ³ H ₂ O	Сплави на мідній основі
Розчин їдкого натру	10 г NaOH на 100 см ³ H ₂ O	Сплави на алюмінієвій основі
Царська горілка	3 см ³ HCl на 1 см ³ HNO ₃	Аустенітні сталі й жароміцні сплави

Розміри зерна визначають механічні властивості й величину питомого опору металів і сплавів. Чим менша величина зерна, тим менша довжина вільного пробігу електрона і більший питомий опір матеріалу.

Величина зерна також істотно впливає на магнітні властивості сплавів. Для отримання *магнітом'яких матеріалів* (з малою коерцитивною силою) розміри зерен мають бути великими і приблизно збігатися з розмірами магнітних доменів. При цій умові досягається легке перенамагнічування доменів. Такі матеріали застосовують для створення магнітопроводів (сердечників трансформаторів, дроселів, реле) у змінних полях.

Для досягнення магнітної твердості необхідно зменшувати розміри зерен, при цьому ускладнюється переорієнтація доменів і зростає величина коерцитивної сили. Такі матеріали називають *магнітотвердими* і використовують для створення постійних магнітів.

У металографічному мікроскопі зображення отримують шляхом відображення світла від плоскої поверхні мікрошліфа. Збільшення створюється двома системами лінз: об'єктивом і окуляром. Загальне збільшення мікроскопа:

$$V = V_{об} V_{ок}, \quad (3.1)$$

де $V_{об}$ – збільшення об'єктива; $V_{ок}$ – збільшення окуляра.

Зазвичай об'єктиви мають збільшення від 3 до 90. Окуляри збільшують відображення, що створюється об'єктивом. Основною характеристикою окуляра є власне збільшення. У звичайних окулярів власне збільшення від 3 до 20.

Якість зображення залежить не лише від ретельності приготування мікрошліфа, але і від використовуваної оптики. Чіткість зображення залежить також від роздільної здатності мікроскопа.

Під роздільною здатністю мікроскопа розуміють найменшу відстань між двома точками, при якій їх видно окремо.

Роздільну здатність визначають за формулою

$$d = \frac{0,61\lambda}{n \sin \phi}, \quad (3.2)$$

де λ – довжина хвилі видимого спектру; d – відстань, що дозволяється; n – показник заломлення, для повітря $n = 1$; ϕ – отвірний (апертурний) кут об'єктива.

Вираз $A = n \cdot \sin \phi$ називається апертурою.

При розгляді об'єктів через повітря ($n = 1$; $A = 1$; $\lambda = 0,4$ мкм)

$$d = \frac{0,61 \cdot 0,4}{1} = 0,24 \text{ мкм.} \quad (3.3)$$

Інтервал збільшень, при якому дві точки, що дозволяються, виразно сприймаються оком, називається *корисним збільшенням мікроскопа*. Максимально корисне збільшення мікроскопа (M) визначають за формулою

$$M = P/d, \quad (3.4)$$

де d – відстань, що дозволяється; P – найменша відстань людського ока, що дозволяється (зазвичай $P = 300$ мкм).

Таким чином, $M = 300/0,24 = 1250$.

Підвищення міри збільшення оптичного мікроскопа понад 1500^{\times} для видимого світла марно, оскільки не призводить до виявлення нових деталей структури.

Для отримання значно більшої роздільної здатності необхідно користуватися електронним мікроскопом. Сучасні електронні мікроскопи дають якісну картину при збільшеннях до 200000^{\times} і більше.

При проведенні кількісних досліджень (визначення величини зерна, глибини цементованого шару та інше) користуються окулярними вкладишами. Це скляні пластинки, на які нанесено шкалу, перехрестя, квадратну сітку і т. п. Ці пластинки вставляються в окуляр між лінзами. Окуляр з вимірювальним вкладишем називається *окуляр-мікрометром*. Відстань між поділками шкали окуляра-мікрометра зазвичай дорівнює $0,1$ мм. Так як окуляри можуть застосовуватися в комбінації з різними об'єктивами, то для кожного збільшення необхідно визначати ціну поділки окуляра-мікрометра. Для цієї мети служить *об'єкт-мікрометр*, який являє собою пластинку зі шкалою. На шкалі нанесено 100 поділок, відстань між поділками дорівнює $0,01$ мм, а загальна довжина шкали – 1 мм.

Ціну поділки окуляра-мікрометра визначають таким чином. На предметний столик поміщають об'єкт-мікрометр шкалою вниз. Спостерігаючи в окуляр, поворотом макрометричного і мікрометричного гвинтів наводять на різкість шкалу об'єкта-мікрометра, переміщуючи очну лінзу в тубусі, отримують чітке зображення шкали окуляра. За допомогою грубої та мікрометричної подач отримують різке зображення шкали об'єкта-мікрометра. Обертанням окуляра поєднують шкалу окуляра-мікрометра зі шкалою об'єкта-мікрометра і встановлюють паралельно штрихи обох шкал.

Підраховують, яка кількість поділок окуляра-мікрометра вміщується у певне число поділок шкали об'єкта-мікрометра. Ціну поділки окуляра-

мікрометра визначають за формулою

$$C_{ок} = \frac{C_{об} \cdot A_{об}}{A_{ок}}, \quad (3.5)$$

де $C_{об} = 0,01$ мм – ціна поділки шкали об'єкта-мікрометра; $A_{об}$ – кількість суміщених поділок об'єкта-мікрометра; $A_{ок}$ – кількість суміщених поділок окуляра-мікрометра.

Наприклад, при такому збільшенні 60 поділок шкали об'єкта-мікрометра рівноцінні 30 поділкам шкали окуляра-мікрометра. Ціна поділки окуляра-мікрометра при такому збільшенні

$$C_{ок} = \frac{0,01 \cdot 60}{30} = 0,02 \text{ мм/под.} \quad (3.6)$$

Знайдена ціна поділки окуляра-мікрометра використовується при встановленні лінійних розмірів досліджуваних мікрооб'єктів.

Завдання

1. Підготувати мікрошліф для виявлення неметалевих включень у сталевому зразку. Відполірувати, промити і висушити мікрошліф. Досліджувати його під мікроскопом при стократному збільшенні, зробити замальовки видимих неметалевих включень і порівняти зі стандартною шкалою (ГОСТ 1778-70), яка має таке ж збільшення. Визначити тип і бал неметалевих включень.

2. Підготувати мікрошліф для визначення розміру зерна мікроструктури. Протравити мікрошліф технічного заліза в 4%-му водному розчині HNO_3 , промити, висушити і дослідити структуру під мікроскопом при стократному збільшенні. Зобразити структуру і визначити номер зерна, користуючись стандартною шкалою (ГОСТ 5939-82).

Зазвичай користуються десятибальною шкалою для визначення номера зерна в сталях. Однак слід знати, що стандартна шкала величин зерна в сталях містить 18 номерів (від № -3, включаючи нульове зерно, до № 14). Номери зерен від 1 до 10 виявляють шляхом візуального порівняння структури при стократному збільшенні мікроскопа зі стандартною шкалою, яка надана для такого збільшення. Номери зерна від -3 до 0 (більші) визначають при двадцятип'ятикратному збільшенні мікроскопа. При цьому вони відповідають номерам 1 – 4 десятибальної шкали. Номери зерна від 11 до 14 визначають при чотирьохсоткратному збільшенні мікроскопа. Вони відповідають номерам 7 – 10 тієї ж десятибальної шкали.

3. Визначити глибину залягання поверхневого шару після хіміко-термічної обробки (азотування) і товщину захисного покриття – плакованого шару алюмінієвого сплаву.

4. Виявити і описати мікроефекти.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Суть мікроструктурного аналізу.
3. Замальовки і аналіз мікроструктури:
 - видів неметалевих включень;
 - величини зерна;
 - глибини залягання поверхневого шару (азотування);
 - товщини захисного покриття;
 - мікродефектів.
4. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що являє собою мікроструктурний аналіз? Що можна виявити з його допомогою?
2. Яка послідовність технологічних операцій приготування мікрошліфів?
3. Які реактиви застосовують для виявлення структури в різних сплавах?
4. Що являють собою роздільна здатність і корисне збільшення мікроскопа?
5. Що являють собою окуляр-мікрометр і об'єкт-мікрометр? Як визначається ціна поділки окуляра-мікрометра за допомогою об'єкт-мікрометра?
6. Як визначається бал неметалевих включень у сталях?
7. Як визначається номер зерна в сталях? Скільки всього номерів зерна в сталях згідно з ГОСТом?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ДІАГРАМ СТАНУ ДВОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМ

Мета роботи

1. Вивчити принципи і правила побудови діаграм стану сплавів.
2. Побудувати основні типи діаграм стану, визначити їх лінії і точки.
3. Придбати практичні навички проведення фазового аналізу і визначення кількісного співвідношення фаз залежно від концентрації компонентів і температури.
4. Встановити закономірності зміни властивостей сплавів з різним типом діаграм стану.

Загальна інформація

У технології виробництва радіоелектронної апаратури (РЕА) і мікроелектроніці широко використовуються сплави провідникових, напівпровідникових, магнітних і конструкційних матеріалів.

Сплавом називається речовина, яку отримали сплавленням або спіканням двох або більше компонентів.

Компонентами називаються хімічні елементи або стійкі хімічні сполуки, що входять до складу сплаву. Компоненти можуть утворювати одну або декілька фаз.

Фазою називається однорідна частина системи, відокремлена від інших частин межами розділу, при переході через яку спостерігається різка зміна властивостей.

Структурною складовою сплаву називається структурно відокремлена частина сплаву, яка має однорідну будову. Структурна складова може бути багатофазною.

Фази в металах і сплавах

У сплавах бувають рідкі та тверді фази. Вважається, що у рідкому стані компоненти, як правило, необмежено розчиняються один в одному, тому сплави розрізняють по фазовому і структурному складу в твердому стані.

Твердими фазами в сплавах можуть бути:

- а) чисті компоненти;
- б) тверді розчини заміщення;
- в) тверді розчини впровадження;
- г) хімічні сполуки;
- д) інтерметалідні з'єднання.

Чисті компоненти виділяються з рідкої фази у вигляді кристалів різної величини в тих випадках, коли компоненти зовсім не розчиняються один в одному в твердому стані, наприклад, у сплавах свинець-сурма, срібло-свинець, олово-цинк та інші.

Твердим розчином називають однофазну структуру з кристалічною решіткою, утворену атомами компонентів, що входять до складу сплаву. Компонент, кристалічна решітка якого зберігається, називається розчинником; компонент, який не зберігає свою кристалічну решітку, а віддає свої атоми в ґрати розчинника, - називається розчинним.

Розрізняють два основних типи твердих розчинів: заміщення і впровадження.

Тверді розчини заміщення утворюються шляхом заміщення атомами розчиненої речовини атомів розчинника в його кристалічній решітці. Тверді розчини можуть складатися з двох і більше компонентів. Тверді розчини заміщення можуть бути з обмеженою і необмеженою розчинністю компо-

нентів один в одному.

Тверді сплави заміщення з необмеженою розчинністю утворюються при дотриманні таких умов:

а) компоненти повинні мати однаковий тип кристалічної решітки (мають бути ізоморфними);

б) різниця атомних радіусів має бути невеликою (не більше 15%);

в) компоненти повинні мати близькі фізичні властивості, однакову або близьку електрозаперечність.

Тверді розчини впровадження утворюються шляхом впровадження окремих атомів розчиненої речовини у вільні пори кристалічної решітки розчинника. Ці тверді розчини характеризуються обмеженою розчинністю розчиненого компонента, який, як правило, має значно менший атомний радіус.

Хімічні сполуки – різноманітні фази, що характеризуються тим, що вони мають свої властивості, кристалічну решітку і температуру плавлення, у з'єднанні зберігається просте кратне співвідношення атомів компонентів, яке можна виразити формулою A_mB_n . Найбільш часто зустрічаються такі хімічні сполуки: карбіди, нітриди, оксиди, сульфідні, бориди та інші.

Інтерметалідні сполуки – хімічні з'єднання між металами. Виділення їх в окрему групу порівняно із звичайними хімічними сполуками доцільно через їхню особливу роль у процесах дисперсійного зміцнення металів і сплавів при термообробленні. Дрібнодисперсними інтерметалідними фазами, які зміцнюють, можуть бути, наприклад, інтерметаліди $CuZn_2$, $CuBe$, Ni_3Al , Ni_3Mo та інші.

Гетерогенні структури

Механічні суміші можуть складатися з чистих компонентів, з твердих розчинів, хімічних сполук і т. п. При утворенні механічної суміші кристалічні ґратки фаз не змінюються. Кристаліти механічної суміші зв'язуються між собою тільки спільними кордонами. Розрізняють евтектичну і евтектоїдну механічні суміші.

Евтектична механічна суміш утворюється при певній постійній температурі з рідкого розчину певного хімічного складу.

Евтектоїдна механічна суміш також утворюється при певній постійній температурі, але тільки при розпаді твердого розчину певного хімічного складу.

Правило фаз Гіббса

Процеси, що відбуваються в металах і сплавах при їх фазових перетвореннях, підпорядковані загальному закону рівноваги, який називається правилом фаз Гіббса. За допомогою правила фаз можна визначити кількісну залежність між числом ступенів свободи, числом компонентів і фаз в

умовах рівноваги.

У загальному вигляді правило фаз виражається рівнянням

$$C = K - \Phi + n, \quad (4.1)$$

де C – число ступенів свободи (під числом ступенів свободи мають на увазі кількість незалежних змінних, зміна якої не призводить до зміни стану рівноваги системи, тобто до зміни числа фаз, що знаходяться в рівновазі; до незалежних змінних відносяться концентрації кожного компонента в кожній фазі та зовнішні чинники – температура и тиск); K – кількість компонентів, що утворюють систему; Φ – число фаз, що знаходяться в рівновазі; n – кількість зовнішніх чинників (температура і тиск).

Враховуючи, що усі перетворення в сплавах відбуваються при постійному тиску, для металевих систем змінним зовнішнім чинником буде тільки температура, тобто $n = 1$.

При $C = 0$ система не має жодного ступеня свободи (система нонваріантна), тобто фази знаходяться в рівновазі при строго певній температурі та концентрації.

Якщо $C = 1$, то це означає, що система за даних умов має один ступінь свободи (система моноваріантна), тобто якщо змінити зовнішній чинник (температуру), то зміниться концентрація рідкої і твердої фаз, але рівновага не порушиться.

При $C = 2$ система за цих умов має два ступені свободи, тобто існує область, в якій можна змінити температуру і концентрацію сплаву, не порушуючи рівноваги.

Правила побудови діаграм стану

Діаграма стану сплаву є графічним зображенням рівноважного стану сплавів залежно від температури і концентрації (починаючи з температур плавлення).

Діаграма стану дозволяє: для конкретних сплавів простежити за процесами, що відбуваються в сплаві при нагріванні та охолодженні; визначити сплави, які мають хороші ливарні властивості, а також сплави, в яких змінюються фізико-механічні властивості шляхом термічної обробки; правильно встановити режими термічної, хіміко-термічної обробки і обробки тиском; вказати, яку структуру будуть мати сплави в рівноважному стані (повільно охолоджені), у деяких випадках згідно з мікроструктурою розрахувати хімічний склад сплаву; правильно вибрати склад сплаву, який має необхідні властивості, та інше.

Діаграми стану будують на основі термічного аналізу, в результаті якого отримують криві охолодження. Розплавлений метал поміщають у калориметр і повільно охолоджують з постійним тепловідводом. Оскільки фазові перетворення в металах і сплавах супроводжуються тепловими ефек-

тами, то на кривих охолодження в координатах "температура – час" можна спостерігати або припинення (майданчики) – тоді фазові перетворення відбуваються при постійних температурах, або перегини за рахунок зміни швидкості охолодження – тоді фазові перетворення протікають в інтервалі температур.

Температури початку і кінця фазових перетворень, які визначаються за кривими охолодження, називаються критичними, а відповідні їм точки на кривих охолодження – критичними точками.

Діаграма стану сплавів, компоненти яких не розчиняються одне в одному у твердому стані

Сплави, що твердіють згідно з цією діаграмою, характеризуються тим, що їх компоненти:

- у рідкому стані розчиняються один в одному в будь-яких співвідношеннях;
- у твердому стані зовсім не розчиняються один в іншому;
- не утворюють між собою хімічних сполук;
- не мають алотропічних перетворень.

Такий тип діаграми мають, наприклад, сплави: свинець-сурма, срібло-свинець, алюміній-олово, свинець-барій, кадмій-вісмут, олово-цинк.

Розглянемо побудову діаграми стану «свинець–сурма» (Pb–Sb). Для цього беруть чисті свинець і сурму і на їх основі готують ряд сплавів з різним вмістом компонентів. Сплави розплавляють і при повільному охолодженні з постійним тепловідведенням записують криві охолодження (рис. 4.1).

Початкові точки кожної кривої охолодження відповідають нульовому відліку часу і рідкій фазі. Точки зламу і горизонтальні майданчики є критичними точками. Чистий свинець (крива 1) має лише одну критичну точку при температурі плавлення 327°C . Чиста сурма (крива 6) також має одну критичну точку, яка відповідає 631°C . Сплав, що містить 13% сурми і 87% свинцю (евтектичний сплав), має одну критичну точку, виражену горизонтальною площадкою при температурі 246°C (крива 3). Всі інші сплави (криві 2, 4, 5) мають по дві критичні точки.

Температури початку кристалізації у цих сплавів різні, а температура кінця кристалізації у всіх сплавів одна і та ж сама і дорівнює 246°C .

Побудова діаграми стану проводиться у координатах «температура – концентрація компонентів».

На осі концентрацій крайні точки відповідають чистим компонентам: ліва координата – 100% Pb, права – 100% Sb. Кожна точка цієї осі характеризує сплав певної концентрації. Проводимо ординати сплавів, для

яких побудовані криві охолодження, і переносимо на них критичні точки. З'єднавши лінією точки початку кристалізації сплавів, отримаємо лінію ACB – лінію ліквідус.

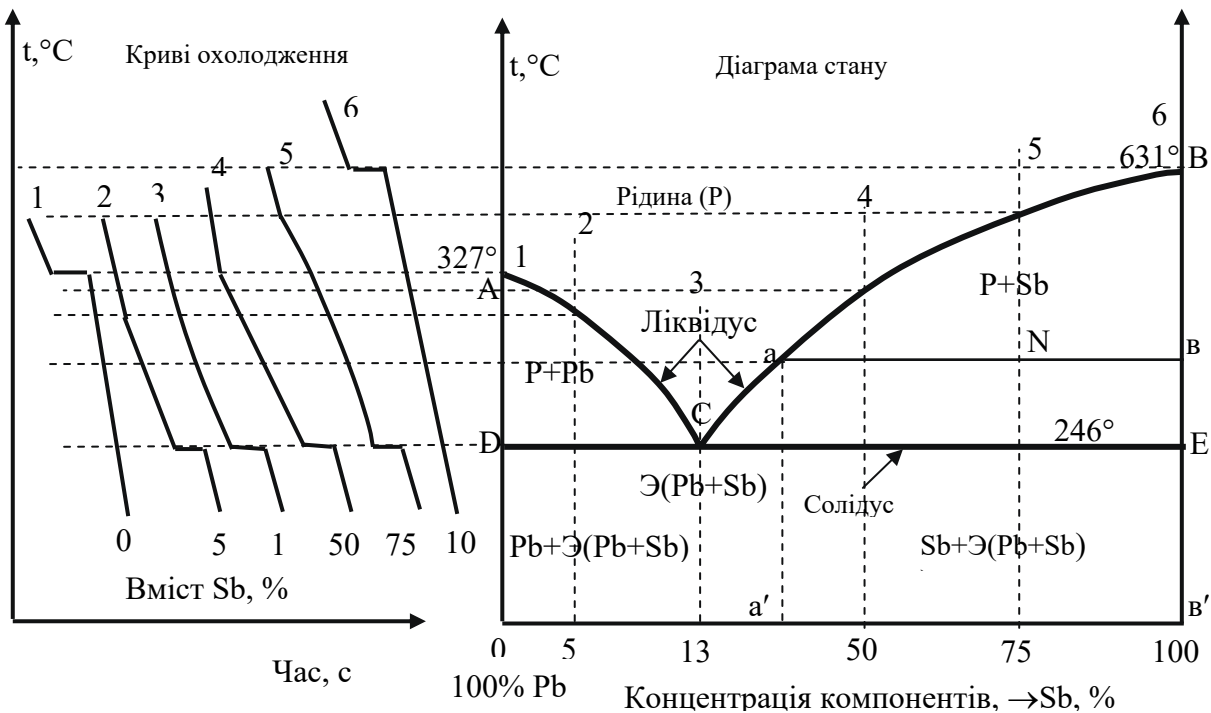


Рис. 4.1. Побудова діаграми стану «свинець–сурма» за кривими охолодження

Лінією ліквідус називається геометричне місце точок початку кристалізації. Вище цієї лінії всі сплави цієї системи знаходяться в рідкому стані.

З'єднавши точки кінця кристалізації, отримаємо DCE – лінію солідус.

Лінією солідус називається геометричне місце точок кінця кристалізації. Нижче цієї лінії всі сплави знаходяться у твердому стані. Лінія солідус на діаграмах цього типу є лінією евтектичного перетворення, оскільки на ній відбувається кристалізація евтектики.

Евтектика – це дрібнодисперсна механічна суміш компонентів (свинцю і сурми) або фаз. Вона має постійний склад і найменшу температуру плавлення. Твердіння евтектики відбувається при постійній температурі.

Сплави лівіше точки C називаються доевтектичними, а правіше – заевтектичними. При кристалізації сплавів, які відрізняються за складом від евтектичного, в першу чергу нижче лінії ліквідус кристалізується надмірний порівняно з евтектичним складом компонент. В доевтектичних сплавах нижче лінії AC кристалізується свинець. У заевтектичних сплавах нижче лінії CB кристалізується сурма.

Для аналізу фазового складу в будь-якій точці двофазної області через цю точку (наприклад N , див. рис. 4.1) проводять горизонтальний від-

різок вліво і вправо до перетину з лініями діаграми. Цей відрізок (*ав*) називається *конодою*.

Маючи коноду, можна відповісти на такі запитання:

1. Які фази існують у даній точці (*N*)? – В точці *N* існують ті фази, які знаходяться в рівновазі на кінцях коноди (рідина в точці *a* і кристали чистого компонента *Sb* в точці *в*).

2. Який склад відповідних фаз? – Склад їх такий, який він у точках на кінцях коноди (рідина в точці *N* має склад точки *a*, а тверда фаза *Sb* – склад точки *в*).

3. Яке кількісне співвідношення фаз? – Якщо всю коноду прийняти за 100%, то співвідношення відрізків *aN* і *Nв* дає співвідношення фаз. Тут діє правило зворотної пропорційності. Відрізок, що прилягає до рідкої фази (*aN*), показує кількість твердої фази, а відрізок, що прилягає до твердої фази (*Nв*), – кількість рідкої фази.

Наприклад, кількість рідкої фази в точці *N*

$$Q_p = \frac{Nв}{ав} 100\%, \quad (4.2)$$

а кількість твердої фази в точці *N* (кристалів *Sb*)

$$Q_{me} = \frac{aN}{ав} 100\%. \quad (4.3)$$

Оскільки на лінії DCE у всіх сплавах кристалізується евтектика, а при подальшому охолодженні аж до кімнатної температури структурних змін у сплавах не відбувається, то структура доевтектичних сплавів буде складатися з великих кристалів свинцю та евтектики, заевтектичних – з великих кристалів сурми та евтектики, заевтектичного сплаву – тільки з евтектики.

Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів один в одному у твердому стані

Необмежені тверді розчини заміщення у твердому стані утворюють компоненти з однотипною кристалічною решіткою, мають невелику різницю в параметрах решітки і близькі за фізичними властивостями. До таких сплавів належать системи: мідь–нікель, мідь–золото, мідь–платина, золото–срібло, залізо–нікель, залізо–ванадій та інше.

Побудова діаграми стану необмежених твердих розчинів проводиться так само, як і побудова діаграм стану евтектичного типу за кривими охолодження (рис. 4.2).

Криві охолодження 1 і 5 характеризують кристалізацію нікелю і міді при постійній температурі, яка дорівнює температурі їх плавлення. Кристалізація всіх інших сплавів (криві 2, 3, 4) протікає при змінній температурі, і характер кривих охолодження для всіх сплавів буде один і той же.

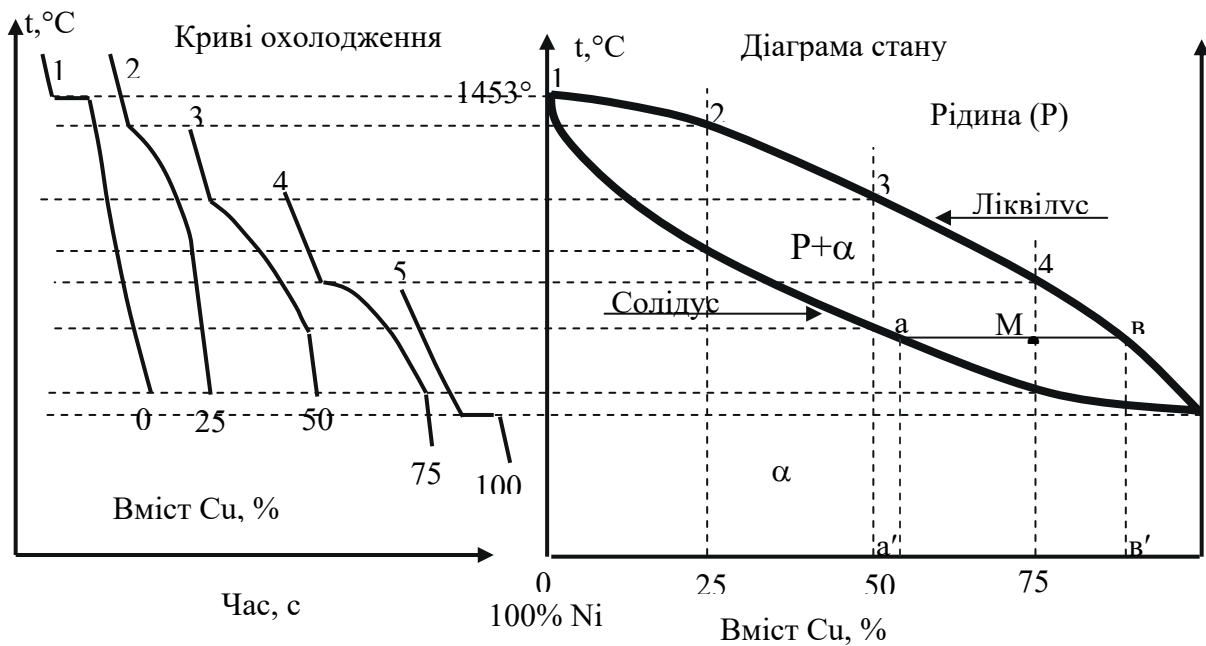


Рис. 4.2. Побудова діаграми стану «нікель–мідь» за кривими охолодження

Якщо перенести критичні точки з кривих охолодження на ординати з відповідним складом сплавів і з'єднати однойменні точки лініями, отримаємо верхню, ледве опуклу лінію – лінію початку кристалізації (ліквідус) і нижню, ледве увігнуту, лінію – лінію кінця кристалізації (солідус).

На цій діаграмі вище лінії ліквідус усі сплави являють собою рідкий розчин компонентів, між лініями ліквідус і солідус рідкий і твердий (α) розчини, а нижче лінії солідус усі сплави однофазні й складаються з α -твердого розчину.

Кристалізація сплавів такої системи починається нижче лінії ліквідус і полягає у виділенні з рідкого розчину кристалів твердого розчину. Склад рідкої фази при зниженні температури буде змінюватися по лінії ліквідус, склад твердої фази – по лінії солідус. У момент закінчення процесу кристалізації при достатньої швидкості дифузії концентрація твердого розчину має дорівнювати вихідній концентрації сплаву.

Як і в попередньому випадку, в двофазній області між лініями ліквідус і солідус для будь-якої точки можна визначити фазовий склад, концентрацію фаз і їх кількісне співвідношення. Наприклад, візьмемо точку M , проведемо через неї коноду, яка перетне лінію ліквідус у точці ϵ , а лінію солідус у точці a . Склад рідкої фази в точці M визначається абсцисою точки ϵ , а саме ϵ' , а склад твердої фази координатою точки a , тобто a' .

Кількість твердої фази – $Q_{\text{тв}} = \frac{M\epsilon}{a\epsilon} 100\%$, кількість рідкої фази –

$$Q_p = \frac{aM}{a\epsilon} 100\%.$$

Оскільки всі сплави у твердому стані являють собою однофазний твердий розчин, то мікроструктура всіх сплавів буде однотипною. На мікрошліфах виявляються тільки границі зерен. Крім того, чим більше в сплаві міді, тим більш рожевою буде його структура, наближаючись поступово до кольору міді.

Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів один в одному в твердому стані

Сплави, що твердіють відповідно до діаграми стану обмежених твердих розчинів, яка характеризується тим, що в рідкому стані компоненти розчиняються один в одному необмежено, а в твердому стані утворюють обмежені тверді розчини і евтектику. Такий тип діаграми мають сплави систем: алюміній–мідь, алюміній–кремній, срібло–мідь, свинець–олово та інше.

У системах такого типу не утворюються фази, що являють собою чисті компоненти. З рідкої фази можуть виділятися тільки тверді розчини α і β (рис. 4.3):

α - твердий розчин – це розчин компонента B у кристалічній решітці компонента A , тобто $A(B)$;

β - твердий розчин – це розчин компонента A в кристалічній решітці компонента B , тобто $B(A)$.

Отже, близько вертикалі A розташована область існування α - твердого розчину на основі компонента A . Ця область – $A'QEA$. Максимальна розчинність компонента B у компоненті A при кімнатній температурі визначається відрізком $A'Q$. Гранична розчинність B в A залежно від температури характеризується кривою QEA .

Близько вертикалі B розташована область β - твердого розчину компонента A в компоненті B ($B'F'FB$). Розчинність компонента A у компоненті B при кімнатній температурі та при температурі до точки F визначається відрізком $F'B'$, далі вона змінюється за лінією FB .

Лінія ACB є лінією ліквідус, $AECFB$ – лінією солідус.

Кристали β , що виділяються з рідини при первинній кристалізації, є первинними і їх записують з індексом (β_I) або без нього (β). Кристали, що виділяються з твердого розчину, позначаються β_{II} (β - вторинні). У сплавів з концентрацією лівіше точки Q вторинні виділення β - кристалів відсутні.

Оскільки розчинність компонента A в компоненті B по лінії $F-F'$ в цьому випадку постійна, то вторинних виділень α - кристалів з β - фази не відбувається.

Більш складні фазові діаграми стану притаманні системам зі стійкими хімічними сполуками типу A_nB_m , які називаються інтерметалічними і виходять при відповідному стехіметричному співвідношенні компонентів (рис. 4.4, г). Діаграми такого типу розбивають на дві (або більше) прості, де як компонент висту-

пає інтерметалід A_nB_m . Такий тип діаграми характерний для системи «Al-Au», оскільки зазвичай золоті проводи з'єднуються з алюмінієвим шаром металізації, розташованим на поверхні кремнію, а також для напівпровідникових хімічних сполук $A^{III}B^V$.

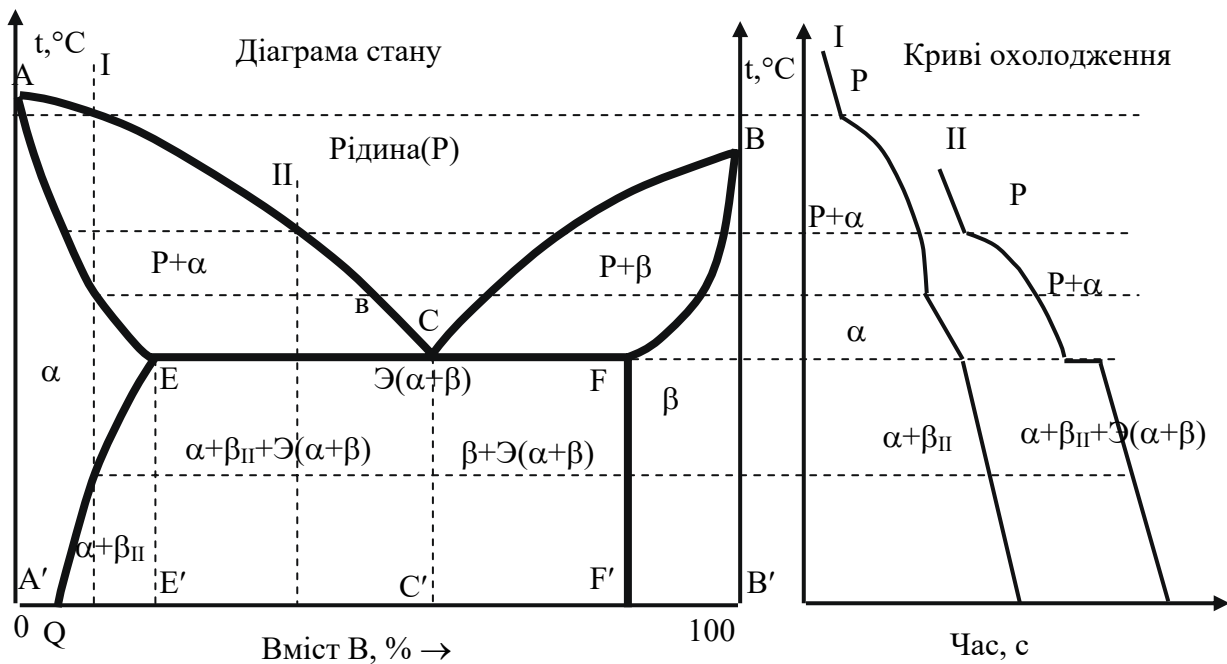


Рис. 4.3. Діаграма стану і криві охолодження сплавів з обмеженою розчинністю компонентів один в одному у твердому стані

Властивості сплавів залежать від типу діаграми стану, складу і структури сплавів. Метод побудови діаграм «склад – властивості», розроблений Н. С. Курнаковим, відкрив певну залежність між властивостями сплавів і діаграмою стану.

На рис. 4.4 зображено діаграми «склад – властивості» залежно від виду діаграм стану (за Н. С. Курнаковим).

Для систем, що утворюють безперервні тверді розчини, залежність властивостей від складу фаз – нелінійна, а для двофазних систем – лінійна.

Аналітичні дані, одержувані при вивченні фазових діаграм стану, мають важливе значення при суміщенні різних матеріалів, визначенні коефіцієнта розподілу домішки, встановленні граничної розчинності домішок у напівпровідниках, обґрунтуванні температур нагрівання при термічній обробці, обробці тиском та в інших випадках.

Опис методу дослідження

Для аналітичного дослідження фазового складу системи використовують діаграми стану сплавів, що застосовуються в електротехніці та в мікроелект-

роніці.

Фазовий склад системи «свинець–сурма» (Pb–Sb) визначається мікро-структурним аналізом.

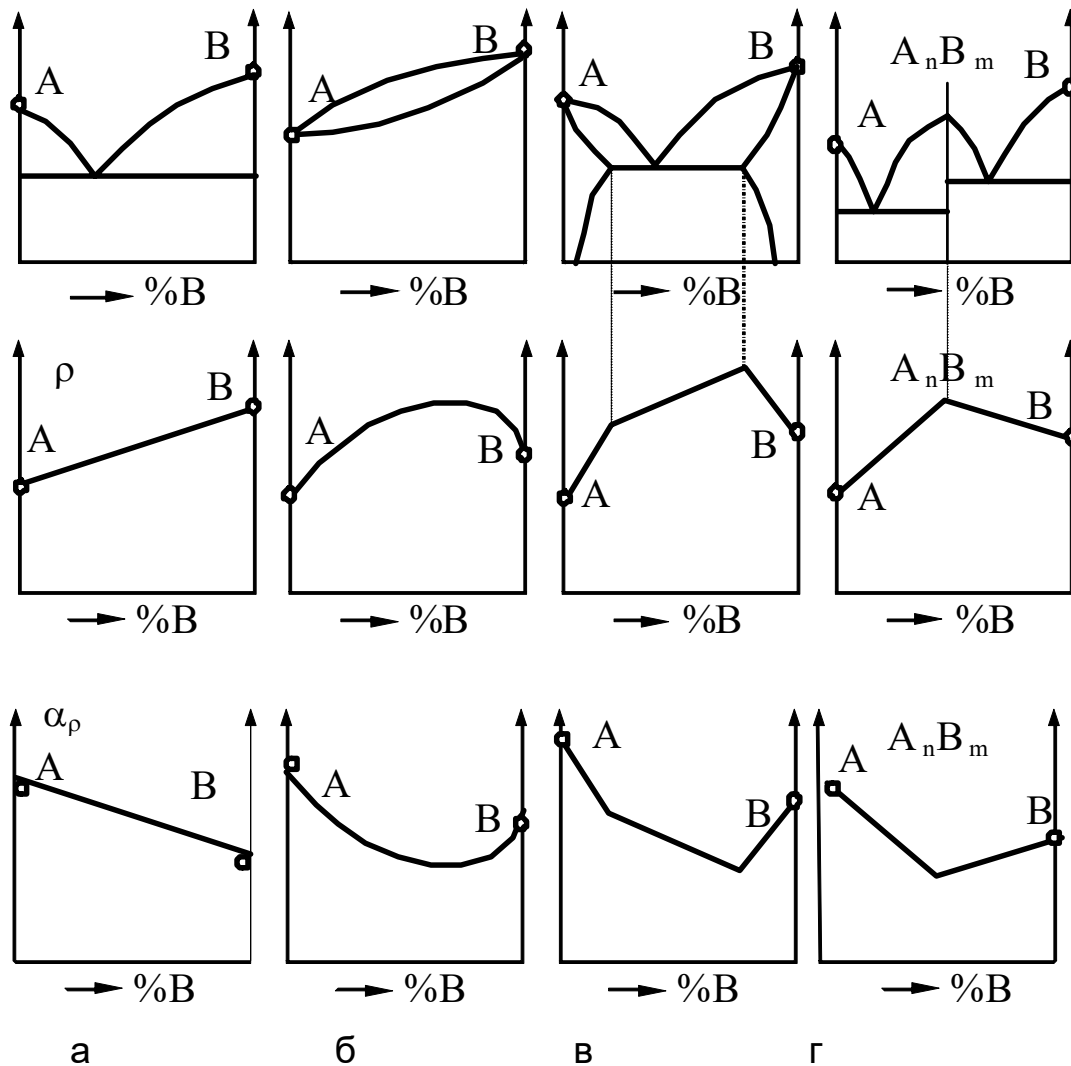


Рис. 4.4. Діаграми стану і відповідні їм діаграми «склад – властивості»

Завдання

1. Виконати розрахунки (у зазначеній викладачем точці) ступеня свободи системи, концентрації компонента B у рідкій і твердій фазах, процентного вмісту рідкої й твердої фаз.
2. Встановити характер зміни властивостей сплаву залежно від концентрації компонентів, використовуючи правило Курнакова.
3. Дослідити мікроструктуру і фазовий склад доевтектичного, евтектичного і заевтектичного сплавів системи «Pb–Sb».

Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача фазову діаграму стану конкретного сплаву.
2. Проаналізувати фазовий склад у заданій точці та визначити число ступенів свободи.
3. Побудувати графіки зміни питомого опору сплаву ρ і α_p залежно від концентрації компонентів.
4. Дослідити під мікроскопом і намалювати мікроструктуру доевтектичного, евтектичного і заевтектичного сплавів системи «Pb–Sb».

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Загальні відомості про сплав, який досліджується.
3. Фазова діаграма сплаву і графіки залежності ρ і α_p від концентрації компонента B .
4. Розрахунки ступеня свободи системи, концентрації компонента та кількості рідкої і твердої фаз.
5. Замальовка мікроструктури системи «Pb–Sb».
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке фаза, компоненти, система сплавів?
2. Як будують діаграми стану і які основні властивості сплавів можна виявити за їхньою допомогою?
3. Які типи діаграм стану можуть утворювати між собою різні компоненти? Від чого залежить той чи інший тип діаграми?
4. Як визначити фазовий склад, концентрацію фаз і кількісне співвідношення між фазами за допомогою правила відрізків?
5. Як змінюються властивості сплавів залежно від їхнього складу і типу діаграми стану?

Лабораторна робота № 5

ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА РОЗТЯГ

Мета роботи

1. Вивчити методику випробувань матеріалів на розтяг.
2. Провести випробування на розтяг двох зразків з різних матеріалів, отримати діаграми розтягування.
3. Визначити положення характерних точок, розрахувати параметри в

- характерних і проміжних точках.
4. На підставі виконаних розрахунків побудувати діаграму умовних напружень.
 5. Визначити основні механічні характеристики матеріалів і дати висновки щодо їхніх властивостей.

Загальна інформація

Механічні властивості конструкційних матеріалів необхідні для розрахунків на міцність деталей та основних технологічних параметрів, а також при виборі технології переробки матеріалу в готовий виріб.

Визначають механічні властивості матеріалу шляхом випробування їх на розтяг, стиск, вигин, ударну в'язкість та іншими методами. Найбільш поширеним методом контролю механічних властивостей матеріалу є випробування на розтяг. Випробування на розтяг регламентуються державним стандартом ГОСТ 1497-84, що містить вимоги до випробувальних машин, вказівки про форму та розміри зразків, поняття механічних характеристик матеріалу, порядок проведення випробувань та оброблення отриманих результатів.

При випробуваннях на розтяг беруть до уваги такі позначення та визначення:

- робоча довжина зразка l (м, мм) – частина зразка з постійною площею поперечного перерізу між його головками або ділянками для захоплення;
- початкова розрахункова довжина зразка l_0 (м, мм) – ділянка робочої довжини зразка між нанесеними до випробування мітками, на якому визначається подовження;
- кінцева розрахункова довжина зразка l_k (м, мм) – довжина розрахункової частини після розриву;
- початковий діаметр зразка d_0 (м, мм) – діаметр робочої частини циліндрового зразка до випробувань;
- діаметр зразка після розриву d_k (м, мм) – мінімальний діаметр робочої частини циліндрового зразка після розриву;
- початкова площа поперечного перерізу зразка F_0 (м², мм²);
- площа поперечного перерізу робочої частини зразка до випробувань;
- площа поперечного перерізу робочої частини зразка після розриву F_k (м², мм²);
- мінімальна площа поперечного перерізу робочої частини зразка після розриву;
- осьове розтягувальне навантаження P (Н, кгс) – навантаження, що діє на зразок у певний момент випробування;
- напруга σ (МПа, кгс/мм²) – напруга, обумовлена відношенням нава-

нтаження P до початкової площі поперечного перерізу F_0 зразка;

- справжня нормальна напруга S (МПа, кгс/мм²) – напруга, обумовлена відношенням навантаження P до дійсної на цей момент випробування площі поперечного перерізу F зразка;
- абсолютне подовження зразка Δl (м, мм) – збільшення початкової розрахункової довжини зразка в будь-який момент випробування;
- межа пропорційності $\sigma_{пц}$ (МПа, кгс/мм²) – напруга, при якій відхилення від лінійної залежності між навантаженням і подовженням досягає такої величини, що тангенс кута, утвореного дотичною до кривої «навантаження – подовження» у точці $P_{пц}$ з віссю навантаження, збільшується на 50% від свого значення на пружній (лінійній) ділянці;
- межа пружності $\sigma_{0,05}$ (МПа, кгс/мм²) – напруга, при якій залишкове подовження досягає 0,05% довжини ділянки робочої частини зразка, яка дорівнює базі виміру;
- модуль пружності E (МПа, кгс/мм²) – відношення приросту напруги до відповідного приросту деформації в межах пружної деформації;
- межа плинності фізична;
- нижня межа плинності σ_T (МПа, кгс/мм²) – найменше напруження, при якому зразок деформується без помітного збільшення навантаження, що розтягує;
- верхня межа плинності $\sigma_{ТВ}$ (МПа, кгс/мм²) – напруга, яка відповідає першому піку навантаження, зареєстрованому до початку плинності робочої частини зразка;
- межа плинності умовна $\sigma_{0,2}$ (МПа, кгс/мм²) – напруга, після зняття якої залишкове подовження досягає 0,2% довжини робочої ділянки зразка;
- тимчасовий опір (межа міцності) σ_B (МПа, кгс/мм²) – максимальне напруження, яке витримує зразок до руйнування;
- відносне рівномірне подовження δ_p (%) – відношення приросту довжини ділянки робочої частини зразка до моменту початку утворення шийки (в т. в) для пластичних матеріалів або до розриву в матеріалах, у яких шийка не утворюється, до довжини до випробування;
- відносне подовження після розриву δ (%) – відношення збільшення розрахункової довжини зразка $\Delta l_k = (l_k - l_0)$ після руйнування до початкової розрахункової довжини l_0 ;
- відносне звуження після розриву ψ (%) – відношення різниці початкової F_0 і мінімальної кінцевої F_k площ поперечного перерізу зразка після руйнування до початкової площі поперечного перерізу зразка F_0 .

Для випробувань на розтяг застосовують пропорційні циліндричні або плоскі зразки (рис. 5.1) діаметром або товщиною до робочої частини 3 мм і більше. Початкова розрахункова довжина циліндричних зразків $l_0 = 5 d_0$, $l_0 = 10 d_0$, а зразків квадратного або прямокутного перерізу – $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ (короткі) або $l_0 = 11,3 \sqrt{F_0}$ (довгі).

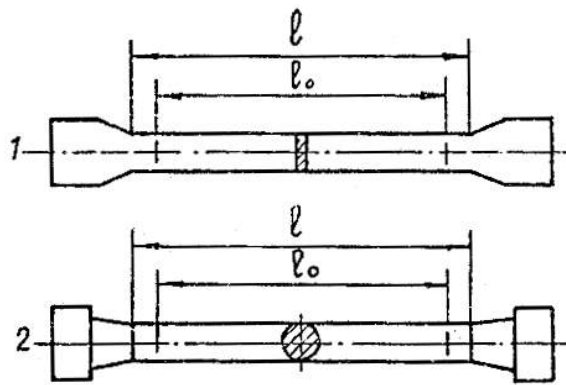


Рис. 5.1. Зразки для випробувань на розтяг:

1 – плоскі; 2 – циліндричні

Як випробувальні застосовують розривні й універсальні машини різних систем. Розтягувальне навантаження P створюється на розривній машині. При розтягуванні зразок подовжується на величину Δl . Розривна машина має самописець, який креслить графік залежності $P = f(\Delta l)$ – діаграму розтягу (рис. 5.2).

Перша ділянка діаграми OP являє собою пряму лінію, тобто між P і Δl

діє закон Гука. Напряга в точці P є межею пропорційності: $\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}$. Міс-

цеположення точки P (межа пропорційності) визначають графічно (рис. 5.3). Довільно горизонтальною прямою перетинають криву розтягування на лінійній ділянці. Отриманий відрізок ac ділять на дві рівні частини. Відкладають відрізок cd , який дорівнює половині відрізка ac : $av = vc = cd$. З початку координат O проводять промінь через точку d . Точку P знаходять побудовою дотичної до кривої розтягування, яка паралельна променю Od .

При подальшому збільшенні сили прямолінійна залежність порушується. Трохи вище точки P знаходиться точка «е». Напряга в точці «е» є

межа пружності $\sigma_{0,05}$, яку обчислюють за формулою $\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}$. Значення

межі пружності $\sigma_{0,05}$ приймають таким, що дорівнює значенню отриманої межі пропорційності $\sigma_{пц}$, внаслідок незначної відмінності між ними. За точкою «е» виникають помітні залишкові деформації, в точці S спостерігається перехід до горизонтального майданчику $S-S'$ (майданчик плинності). Для ділянки $S-S'$ характерно зростання деформації без помітного збільшення навантаження. Якщо позначити величину навантаження, що відповідає майданчику плинності, через P_T , то напряга в цій точці можна обчис-

лити за формулою $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$, що і є фізичною межею плинності.

Для матеріалів, що не мають на діаграмі майданчика плинності, визначають умовну межу плинності $\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$.

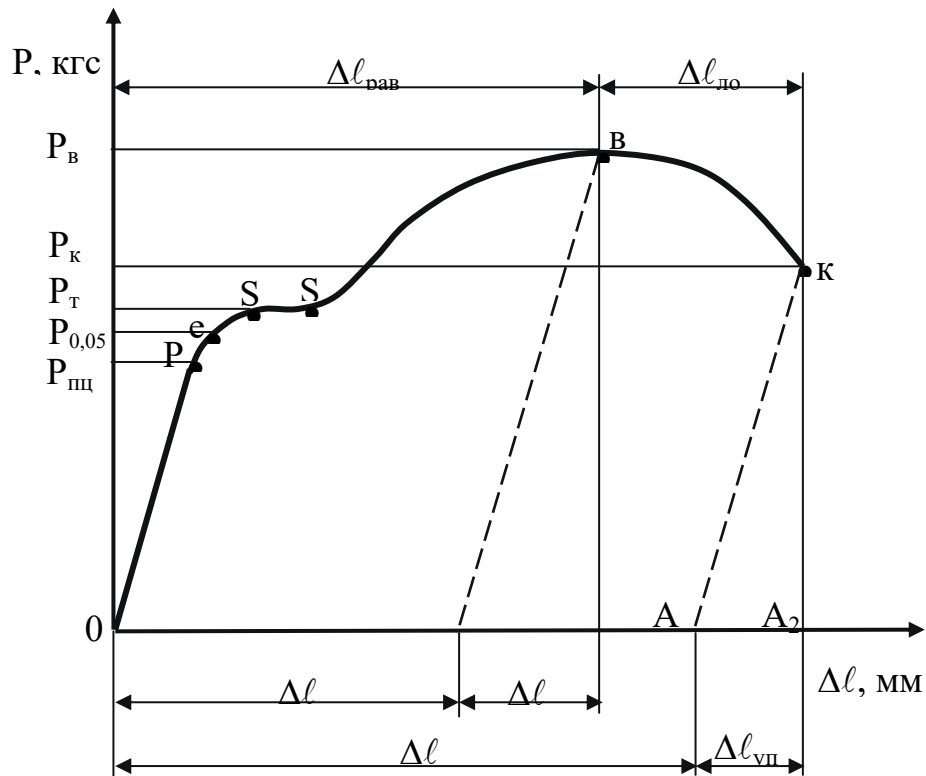


Рис. 5.2. Характерні ділянки і точки діаграми розтягування

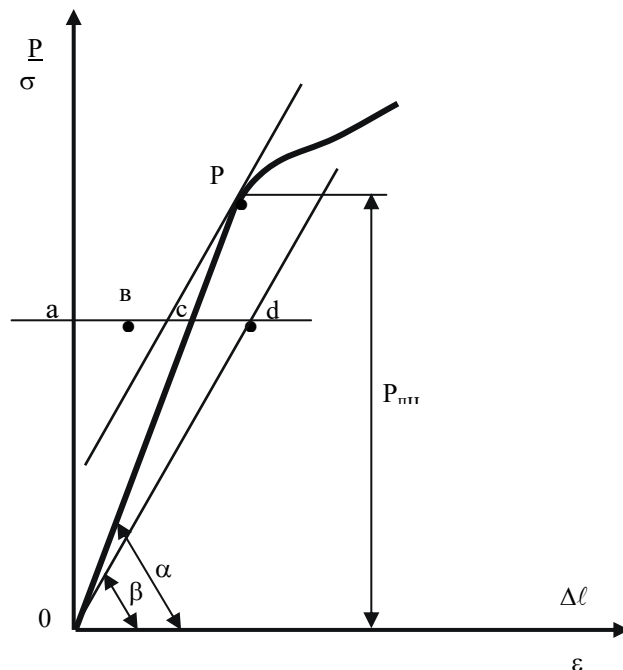


Рис. 5.3. Визначення місця розташування точки P , що відповідає межі пропорційності

Для знаходження величини $P_{0,2}$ у масштабі діаграми по осі абсцис

вправо від точки O (рис. 5.4) відкладають відрізок OE , що дорівнює $0,002l_0$, а із точки E проводять пряму, паралельну прямій OP , до перетину з кривою розтягування в точці S . Ордината цієї точки визначає навантаження $P_{0,2}$. За майданчиком плинності відбувається зміцнення матеріалу, опір деформації збільшується, тому спостерігається збільшення навантаження на кривій розтягування. До точки «в» зразок деформується рівномірно.

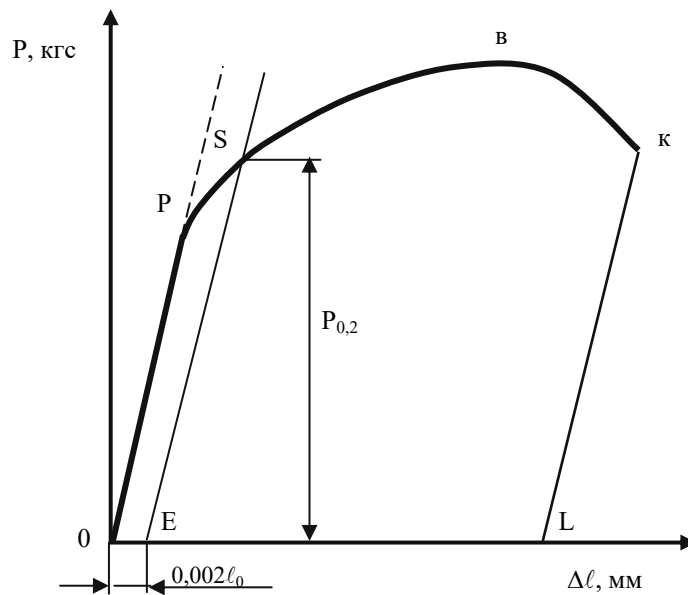


Рис. 5.4. Визначення місцеположення точки S , яка відповідає умовній межі плинності

Найбільше навантаження, яке передуює руйнуванню зразка, позначається $P_B = P_{\max}$. Напряга в точці «в» називається тимчасовим опором, або межею міцності: $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}$.

Після точки «в», що відповідає максимальній силі P_B , відбувається помітне місцеве звуження зразка (шийка). Якщо до цього зразок мав циліндричну форму, то тепер розтягування зразка зосереджується в області шийки. На ділянці в-к переріз зразка швидко зменшується, внаслідок чого зменшується розтягувальне навантаження. У точці «к» зразок розривається по найменшому перерізу шийки F_K .

Характеристиками пластичності зразка є відносне залишкове подовження після розриву

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} 100 \% = \frac{\Delta l_{\text{ост.п}}}{l_0} 100 \% \quad (5.1)$$

і відносне звуження Ψ після розриву

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} 100 \% = \frac{\Delta F_K}{F_0} 100 \%, \quad (5.2)$$

виражене у відсотках.

Діаграма розтягування $P-\Delta l$ характеризує поведінку зразка з випробовуваного матеріалу з певними геометричними розмірами. Щоб виключити вплив розмірів, діаграму $P-\Delta l$ перебудовують у діаграму $\sigma-\varepsilon$, де $\sigma = \frac{P}{F_0}$ – напруження, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ – відносна деформація. Діаграма $\sigma-\varepsilon$ – це діаграма $P-\Delta l$, тільки перебудована в масштабі $1/F_0$ по осі ординат і в масштабі $1/l_0$ – по осі абсцис.

Чисельні значення механічних характеристик дозволяють оцінити міцність і пластичні властивості випробовуваного матеріалу (табл. 5.1).

Опис установки і методу дослідження

Випробування на розтягнення проводять на розривній машині Р-5 з важільно-маятниковим силовимірником. Для дослідів використовують зразки круглого перерізу ($d_0 = 6$ мм, $l_0 = 10d_0$). Їх поміщають у затискачі машини і дають попереднє навантаження. Потім проводять випробування на розтягнення, записуючи діаграму (опис і принцип роботи розривної машини дивіться на робочому місці).

Таблиця 5.1

Оцінка міцності та пластичності матеріалів

Матеріал	σ_B		Рівень міцності	$\delta, \%$	Рівень пластичності
	кгс/мм ²	МПа			
Сталі	140-200 і більше	1400-2000 і більше	високоміцні	>40	високопластичні
	80-140	800-1400	міцні	20-40	пластичні
	20-80	200-800	середньої міцності	10-20	середньої пластичності
	<20	<200	маломіцні	<10	малопластичні
Алюмінієві сплави	>50	>500	високоміцні	25-35	підвищеної пластичності
	35-40	350-400	нормальної міцності	20-25	пластичні
	<35	<350	маломіцні	<20	малопластичні

Завдання

1. Ознайомитися з облаштуванням розривної машини Р-5.
2. Провести випробування зразків на розрив.
3. Визначити основні механічні характеристики матеріалів і побудувати графіки $\sigma = f(\varepsilon)$.
4. Зробити висновок про міцнісні та пластичні властивості матеріалів.

Таблиця 5.2

Вихідні дані

Матеріал	d_0 , мм	d_k , мм	l_0 , мм	l_k , мм	F_0 , мм ²	F_k , мм ²	P_{max} , кгс	Масштаб	
								m_p , кгс/мм	$m_{\Delta l}$, мм/мм

Таблиця 5.3

Результати оброблення діаграми розтягування

Параметр	Матеріал зразка	Значення параметрів у характерних і довільних точках							
Навантаження P , кгс									
Абсолютне подовження Δl , мм									
Напруга $\sigma = P/F_0$, кгс/мм ²									
Відносне подовження $\varepsilon = \Delta l/l_0$, %									

Протокол випробувань матеріалів на розтяг

Характеристика	Марка матеріалу	
Межа пропорційності $\sigma_{пц}$, кгс/мм ²		
Фізична межа плинності σ_T , кгс/мм ²		
Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²		
Межа міцності σ_B , кгс/мм ²		
Відносне подовження δ , % :		
Відносне звуження ψ , %		
Висновок про властивості досліджуваного матеріалу:		
- міцнісні		
- пластичні		

Порядок виконання роботи

1. Підготувати до роботи розривну машину.
2. Виміряти діаметр d_0 і довжину l_0 зразка, що випробовують. Результати вимірювань записати в табл. 5.2.
3. Провести випробування зразків на розрив (випробування проводить навчальний майстер).
4. Знайти максимальне навантаження за відліковим пристроєм і записати його значення в табл. 5.2.
5. Визначити на діаграмі положення точок p , s , k і відповідні їм значення навантажень і деформацій. Занести результати в табл. 5.3. Порівняти значення P_{max} , яке зафіксував відліковий пристрій.
6. Обчислити значення основних механічних характеристик матеріалу і результати розрахунків занести в табл. 5.3.
7. Скласти частини розірваного зразка, заміряти довжину l_k . Результати записати в табл. 5.2 і порівняти їх з величиною l_0 на діаграмі.
8. Побудувати графік $\sigma = f(\varepsilon)$, де $\varepsilon = \Delta l / l_0$ – відносна деформація.
9. Скласти протокол випробувань (табл. 5.4).

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Діаграми розтягу зразків.
3. Графіки $\sigma = f(\varepsilon)$.
4. Розрахунки основних механічних характеристик матеріалів.
5. Протокол випробувань.

Контрольні запитання

1. Що називається діаграмою розтягу?
2. Як знаходять на діаграмі положення характерних точок: p , s , k ?
3. Які характеристики визначають міцнісні властивості матеріалу?
4. Які характеристики визначають пластичні властивості матеріалу?

Лабораторна робота № 6

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи

1. Вивчити методи вимірювання твердості матеріалів і області їх застосування.
2. Визначити твердість зразків конкретних матеріалів.

Загальна інформація

Твердість – одна з механічних характеристик конструкційних, провідникових, напівпровідникових, магнітних і діелектричних матеріалів, яка пов'язана з такими важливими властивостями, як міцність, зносостійкість, технологічність та інше.

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір впровадженню в нього інших тіл певної форми і розмірів під дією певних сил. Вимірювання твердості можна здійснювати за методами Брінелля, Роквелла і Віккерса.

При визначенні твердості металів і сплавів найбільш широко застосовується метод Брінелля. Сутність методу полягає у вдавлюванні сталевий загартованої кульки діаметром 2,5; 5,0 або 10 мм зразок (виріб), що випробовується, під дією навантаження, яке прикладене перпендикулярно до поверхні зразка протягом певного часу, і вимірюванні діаметра відбитка після зняття навантаження (рис. 6.1).

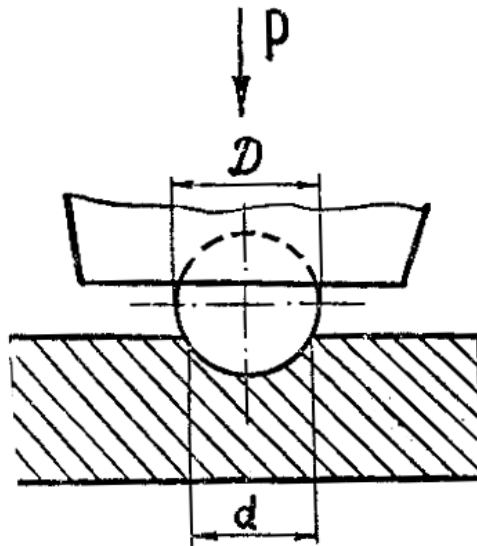


Рис. 6.1. Схема отримання відбитка

Твердість за методом Брінелля визначається відношенням прикладеного навантаження P (кгс) до площі поверхні відбитка F (мм²):

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (6.1)$$

Площа поверхні у вигляді кульового сегмента визначається виразом

$$F = \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right), \quad (6.2)$$

де D – діаметр кульки, мм; d – діаметр відбитка, мм.

Твердість виражається в МПа або в кгс/мм². При визначенні твердості за методом Брінелля навантаження і діаметр кульки мають відповідати закону подібності

$$P = kD^2, \quad (6.3)$$

де k – постійна для певного матеріалу величина, що дорівнює 30, 10 або 2,5, яку вибирають залежно від виду матеріалу, його передбачуваної твердості та товщини випробовуваного зразка.

Діаметр кульки D , навантаження P і тривалість витримки τ вибирають згідно із ГОСТом залежно від виду матеріалу, його орієнтовної твердості HB і товщини зразка δ (табл. 6.1). У табл. 6.1 наведено також значення коефіцієнта k .

Між числом твердості за методом Брінелля HB і межею міцності σ_b існує приблизна кількісна залежність:

$$\sigma_b = k \cdot HB,$$

де k – коефіцієнт, визначений дослідним шляхом.

Це дозволяє, якщо знаємо твердість за методом Брінелля, оцінити міцність матеріалу деталі, не вдаючись до випробувань на розтяг, тобто не руйнуючи її.

Таблиця 6.1

Вибір діаметра кульки, навантаження і тривалості витримки

Матеріал	Твердість за Брінеллем	Товщина зразка δ , мм	Коефіцієнт k	Діаметр кульки D , мм	Навантаження P , кгс	Витримка під навантаженням τ , с
Чорні метали	>140-150	6-3 3-2 < 2	30	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	10
-«-	< 140	> 6 6-3 < 2	10	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	10
Кольорові метали	> 130	6-3 4-2 < 2	30	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	30
-«-	35-130	9-5 6-3 < 2	10	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	30
-«-	8-35	> 6 6-3 < 3	2,5	10,0 5,0 2,5	250 62,5 15,6	30

Переваги методу Брінелля – простота і надійність у роботі приладів, що застосовуються для визначення твердості, висока точність визначення твердості, так як при досить великому діаметрі відбитка виключається вплив локальних факторів.

Недоліки метода:

- метод не може бути застосований для випробування металів з $HV > 450$;

- метод непридатний для визначення твердості листових зразків товщиною менше 0,5...1 мм і виробів малої жорсткості;

- на поверхні виробу, що випробовується, залишаються помітні відбитки.

Вимірювання твердості металів і сплавів за методом Роквелла здійснюється вдавненням алмазного конуса або сталевий кульки з подальшим визначенням твердості за глибиною отриманого відбитка (ГОСТ 9013-59).

Алмазний конус з кутом при вершині 120° або сталевий кулька діаметром 1,588 мм (1/16") вдавлюються в зразок (виріб), що випробовується, під дією двох навантажень, послідовно прикладених – попереднього $P_0 = 10$ кгс і загального P , яке дорівнює сумі попереднього і основного P_1 навантажень. Загальне навантаження P становить 100 кгс при вдавлюванні кульки і 150 або 60 кгс при вдавлюванні конуса.

Твердість за Роквеллом HR обчислюють так:

$$HR = \frac{k - (h - h_0)}{c}, \quad (6.4)$$

де h_0 – глибина впровадження наконечника під дією попереднього навантаження, мм; h – глибина впровадження наконечника під дією загального навантаження, мм; k – постійна величина, що дорівнює 0,26 мм для кульки і 0,2 мм для алмазного конуса; c – ціна поділки шкали індикаторного приладу, що відповідає впровадженню наконечника на 0,002 мм.

Шкала, вид наконечника і навантаження вибираються залежно від приблизної твердості HB матеріалу, який випробовують.

Твердість за Роквеллом виражається в умовних одиницях і відлічується за шкалою індикатора безпосередньо в процесі випробування. Шкала індикаторного приладу має три шкали – А, В і С, що відповідає алмазному конусу, кулі й твердосплавному конусу.

Твердість за Роквеллом позначається цифрами, що характеризують число твердості, й літерами HR із зазначенням шкали твердості, наприклад 60 HRC.

Межу міцності матеріалу знаходять за формулою $\sigma_B = K \cdot HB$, для чого величини HR попередньо переводять за допомогою таблиць у HB.

Порівняно з методом Брінелля метод Роквелла є більш універсальним, оскільки дозволяє випробовувати метали будь-якої твердості, включаючи тверді сплави. За методом Роквелла можна також визначати твердість порівняно тонких зразків (товщиною до 0,4 мм). Наявність індикаторного приладу дозволяє визначити число твердості безпосередньо відліком за шкалою і тим самим робить цей метод більш продуктивним, проте точність визначення числа твердості нижче, тому треба провести кілька вимірів і знайти середню величину.

Твердість лакових плівок, стекл та інших крихких матеріалів вимірюють маятником Кузнєцова – легкою металевою рамкою, яка укріплена на сталевих кульках. На кінці маятника укріплена голка, що торкається поверхні матеріалу. Маятник приводять у коливальний рух, амплітуда коливання відзначається курсором у шкалі приладу. Чим менше твердість, тим швидше згасають коливання.

Для оцінювання твердості крихких неорганічних матеріалів існує умовна десяткова шкала твердості, в основі якої лежить твердість ряду природних матеріалів. За одиницю твердості прийнята твердість тальку. Твердість алмазу становить 5×10^6 твердості тальку. Твердість речовини встановлюють за її опором дряпанню. Речовини, твердість яких нижче 2, дряпають нігтем, нижче 5 – ножем, нижче 7 – напилком і т. п.

Опис установки і методу дослідження

Для визначення твердості за Брінеллем і Роквеллом користуються

твердомірами типу ТШ-2 і ТК-2М. Прилад ТШ-2М складається з станини, в нижній частині якої поміщений гвинт зі столиком для випробування зразків, а у верхній – шпindel змінними наконечниками. Навантаження прикладається до зразка за допомогою важільної системи. Прилад ТК-2М має станину, змінні наконечники, важільну систему прикладання навантаження та індикаторний прилад для відліку чисел твердості.

Завдання

1. Визначити твердість за методом Брінелля на двох зразках різних матеріалів.
2. Виміряти твердість за методом Роквелла на двох зразках матеріалів.
3. Виконати розрахунок межі міцності випробуваних матеріалів.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати зразки матеріалу до випробувань. Поверхня зразка має бути плоскою, відшліфованою і щільно прилягати до опорного столика.
2. Підготувати прилад ТШ-2М до роботи. Вибрати вид наконечника, навантаження і встановити час витримки.
3. Включити прилад у мережу.
4. Піджати, обертаючи маховик, випробуваний зразок до наконечника, створюючи попереднє навантаження.
5. Натиснути пускову кнопку. При цьому включається електродвигун і навантаження передається на зразок.
6. Заміряти за допомогою лупи діаметр відбитка, за яким з таблиці, наведеної на робочому місці, визначити число твердості НВ.
7. Повторити дії пп. 4 - 6, результати занести в табл. 6.2.
8. Підготувати прилад ТК-2М до роботи, для чого вибрати наконечник і навантаження.
9. Встановити зразок на вимірювальний стіл і включити тумблер живлення приладу.
10. Навести зразок у зіткнення з наконечником, обертаючи гвинт столу і поєднуючи малу стрілку з червоною точкою на шкалі приладу.
11. Підвести велику стрілку індикатора до нуля шкали.
12. Натиснути і відпустити вимірювальний важіль приладу.
13. Занести показання приладу в табл. 6.3.

14. Повторити дії пп. 9 - 12 два рази.

Таблиця 6.2

Результати випробування твердості за методом Брінелля

Марка матеріалу	Діаметр кульки, мм	Навантаження Р, кгс	Час витримки	Число твердості			Середнє число твердості НВ, кгс/мм ²	Межа міцності, кгс/мм ²
				1	2	3		

Таблиця 6.3

Результати випробування твердості за методом Роквелла

Марка матеріалу	Наконечник	Навантаження Р, кгс	Шкала	Число твердості			Середнє число твердості	Число твердості НВ, кгс/мм ²	Межа міцності, кгс/мм ²
				1	2	3			

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Загальні відомості про матеріали, які випробовуються.
3. Таблиці з результатами визначення твердості за методами Брінелля і Роквелла.
4. Результати розрахунків межі міцності матеріалів, які випробовуються.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що називається твердістю матеріалу?
2. Які методи використовуються для визначення твердості матеріалів?
3. Як знаходять число твердості за методом Брінелля?
4. Яка залежність існує між числом твердості за методом Брінелля і межею міцності матеріалу?

Лабораторна робота № 7

ВИЗНАЧЕННЯ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи

1. Засвоїти метод визначення нагрівостійкості різних ізоляційних матеріалів за допомогою печі Мартенса.
2. Встановити клас нагрівостійкості термопластичних полімерів.

Загальні відомості

Нагрівостійкістю називається здатність діелектрика витримувати короткочасні й тривалі дії високих температур без істотного погіршення його механічних й електричних властивостей.

В електричних машинах і апаратах підвищення робочої температури, що лімітуються лише матеріалами електричної ізоляції, дає можливість при заданій потужності зменшити габаритні розміри, масу і вартість виробу. Це особливо важливо для літакового і ракетного електрообладнання, де зменшення маси виробу і габаритів виступає на перший план.

Матеріали, залежно від їхньої поведінки при нагріванні, поділяють на термопластичні, термостабільні та термореактивні.

Термопластичні – це, як правило, матеріали з лінійною або слабо розгалуженою структурою, які при нагріванні розмягчуються і навіть розплавляються, переходячи у в'язкотекучий стан, а при охолодженні тверднуть. Ця властивість зберігається при багаторазових нагріваннях і охолодженнях.

Термостабільні матеріали мають зшиту сітчасту структуру. При нагріванні вони не розм'якшуються аж до температури розкладання. При розкладанні вони поглинають велику кількість тепла, тому застосовуються для теплозахисних покриттів.

Термореактивні – це матеріали з лінійною будовою, які при нагріванні розм'якшуються, розплавляються, набувають в'язкотекучого стану, а потім за рахунок хімічних реакцій – сітчастої будови, переходячи необоротно в термостабільний стан.

Верхня межа допустимих робочих температур обґрунтована температурою, вище якої починається помітне погіршення електричних і механічних параметрів матеріалів.

Міжнародна електрична комісія (МЕК) умовно, беручи до уваги верхню межу робочих температур, поділила всі діелектрики на сім класів нагрівостійкості. Так, для класу У робоча температура має бути не вище 90°C, для класу А – до 105°, для класу Е – до 120 °С, для класу В – до 130° С, для класу F – до 155°C, для класу Н – до 180°C, а для класу С – вище 180°.

Нижню межу допустимих робочих температур знаходять з умови збереження еластичності, в'язкості, гнучкості, механічної міцності матеріалів і стійкості до утворення тріщин при згині.

Нагрівостійкість термореактивних і неорганічних діелектриків відповідає температурам помітного зростання $\tan\delta$ або зниження питомого об'ємного електроопору ρ_v .

Нагрівостійкість рідких діелектриків характеризується температурою спалаху їх парів у суміші з повітрям або температурою займання самої рідини. Нагрівостійкість термопластичних органічних діелектриків встановлюють, беручи до уваги початок механічної деформації розтягування, вигину або занурення голки під тиском.

Теплостійкість легкоплавких матеріалів (парафін, церезин, озокерит, бітуми і т.д.) визначають методом «кільця і кулі».

Припустима робоча температура електроізоляційних матеріалів завжди має бути нижче температури плавлення, розм'якшення або спалаху парів, щоб забезпечити необхідну механічну міцність, довговічність і надійність роботи виробу.

Для крихких ізоляторів (скла, кераміка і т.п.) важливим параметром є стійкість до різких змін температур - «теплого удару»:

$$F = \frac{\sigma_b}{\alpha_b F} \sqrt{\frac{\lambda_m}{C \rho}}, \quad (7.1)$$

де α - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; σ_b - межа міцності матеріалу при розтягуванні; E - модуль Юнга (пружності); λ_t - коефіцієнт теплопровідності; C - питома теплоємність; ρ - щільність.

У цій лабораторній роботі слід встановити клас нагрівостійкості термопластичних матеріалів за допомогою печі Мартенса. Нагрівостійкість визначається температурою, при якій вигинаюча напруга $\sigma_{із} = 50 \text{ кгс/см}^2$ спричиняє помітну деформацію стандартного зразка при швидкості підвищення температури 1°C у хвилину.

Піч Мартенса складається з навантажувальної панелі й термостата з регулятором температури. Навантажувальна панель розрахована на випробування трьох зразків одночасно. Конструктивно вона виконана з нижніх вузлів кріплення, встановлених на панелі, і верхніх, забезпечених навантажувальними важелями довжиною 240 мм. Зразки встановлюють вертикально у нижні вузли, а потім на них закріплюють верхні вузли з вантажами.

Для цього фіксуючими гвинтами необхідно виставити зазор (6 ± 1 мм) між контактами панелі та верхніми вузлами кріплення. Потім панель із зразками поміщають у термостат, причому її торець має увійти в його замикаючий контакт. До кожного з випробуваних зразків підключають контакти звукової та світлової сигналізації (рис. 7.1).

Термостат – це піч, яка забезпечена термоізоляцією, двома термометрами, дверцятами зі склом і лампою-підсвічуванням. Регулятор температури працює автоматично, він оздоблений годинниковим механізмом, ртутним реле, перемикачем і термодатчиком, виготовленим з кварцового стрижня, вміщеного у мідну трубку. При нагріванні мідна трубка подовжується і діє на кварцовий стрижень, в якому виникає зворотний п'єзоефект, що коригує швидкість нагріву печі, яка дорівнює 50 °С на годину.

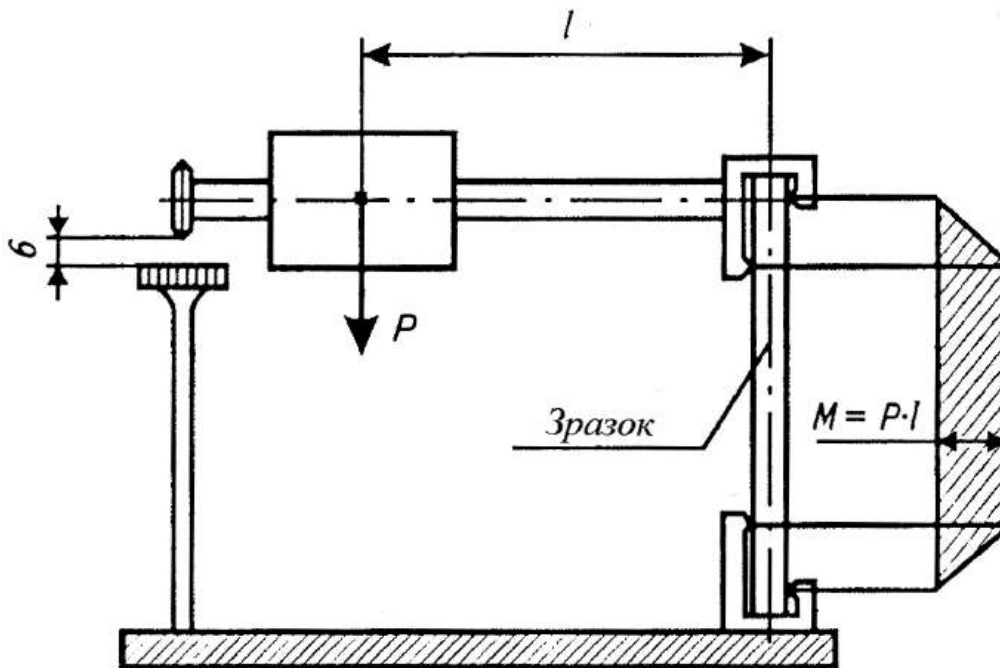


Рис. 7.1. Схема випробування зразка

Завдання

1. Закріпити вертикально у нижніх держаках панелі зразки, що досліджуються.
2. Закріпити горизонтально на верхніх кінцях зразків навантажувальні важелі, щоб зазор між їхніми контактами був не більше 6 ± 1 мм.
3. Встановити панель із зразками, що випробовуються, у піч таким чином, щоб торець панелі увійшов у затискний контакт.
4. Підключити до кожної системи зразків, що випробовуються, контакти сигнального пристрою.
5. Встановити термометри лівий (вертикальний) і правий (похилий) так, щоб ртутні кульки торкались: перший - верхнього кінця зразка, а другий - нижнього.
6. Закрити піч Мартенса і включити її в мережу.
7. Зафіксувати температуру в момент замикання контактів і включення звукового та світлового сигналів.

8. Знайти середню температуру:

$$T_{\text{cp}} = (T_1 + T_2) / 2. \quad (7.2)$$

9. Визначити клас нагрівостійкості матеріалів, що випробовуються.

10. Дані занести до табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Результати вимірювань

Матеріал	$T_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{cp}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Клас нагрівостійкості

10. Виконати схему навантаження зразків і розрахувати вигинаючий момент.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стисло подані відомості про матеріали, що випробовуються.
3. Схема випробувань діелектриків щодо нагрівостійкості за методом Мартенса.
4. Результати вимірювань температури нагрівостійкості (див. табл. 7.1).
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. У чому відмінність термопластичних і термореактивних діелектриків?
2. Що таке нагрівостійкість діелектрика?
3. Як визначається нагрівостійкість діелектриків за методом Мартенса?
4. Як визначити нагрівостійкість термореактивних діелектриків?
5. Поясніть, чому матеріали, що випробовувались, мають різну температуру нагрівостійкості.

Лабораторна робота № 8

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОПІР ПРОВІДНИКІВ І НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи

1. Ознайомитися з методом вимірювання опору провідників і напівпровідників.

2. Визначити залежність опору провідників і напівпровідників від температури.

3. Обчислити температурний коефіцієнт опору провідників і напівпровідників.

Загальні відомості

У сучасних пристроях електрорадіотехніки широко використовуються деталі, виконані з провідникових і напівпровідникових матеріалів. Основна область застосування провідникових матеріалів - виготовлення резисторів, провідників і контактних майданчиків ІМС, напівпровідникових - діодів, тріодів, термісторів напівпровідникових ІМС та інших приладів.

Основними електричними характеристиками провідникових матеріалів є питомий опір ρ і температурний коефіцієнт питомого опору α_ρ .

Питомий опір визначають таким чином:

$$\rho = \frac{S}{l} \cdot R, \quad (8.1)$$

де S – площа поперечного перерізу провідника, l – його довжина, R – опір матеріалу.

Згідно з електронною теорією величина питомого опору металевго провідника може бути виражена формулою Зоммерфельда:

$$\rho = \frac{2m^* \mu}{n \bar{l} e^2}, \quad (8.2)$$

де m^* – маса електрона; μ – середня швидкість теплового руху електрона всередині металевго провідника; n – число вільних електронів у одиниці об'єму провідника; \bar{l} – середня довжина вільного пробігу електрона.

Оскільки для більшості провідників середні швидкості теплового руху електронів приблизно однакові, а концентрації вільних електронів відрізняються незначно, то величина питомого опору в основному залежить від середньої довжини вільного пробігу електрона в цьому провіднику.

Повний опір металів і сплавів можна записати як суму двох доданків:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \quad (8.3)$$

де ρ_T – опір, зумовлений розсіюванням електронів на теплових коливаннях решітки; $\rho_{ост}$ – залишковий опір, пов'язаний із розсіюванням електронів на неоднорідностях структури.

Усі чисті метали з правильною кристалічною решіткою характеризуються найменшими значеннями питомого опору, а сплави завжди мають порівняно з компонентами, що входять до їхнього складу, підвищене значення ρ . Це пояснюється тим, що в сплавах середня довжина вільного пробігу електронів зменшується порівняно з чистими металами через спотворення кристалічної решітки.

З підвищенням температури збільшується амплітуда теплових коливань вузлів кристалічної решітки провідника і на шляху спрямованого руху електронів виникає все більше і більше перешкод. У результаті нагрівання середня довжина вільного пробігу електронів зменшується, а оскільки концентрація n із зростанням температури не змінюється, то опір збільшується.

Зміна питомого електроопору металевого провідника залежно від температури може бути виражена залежністю

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha_p \Delta t^\circ), \quad (8.4)$$

де Δt – інтервал температур; ρ_0 – значення питомого електроопору на початку діапазону; α_p – температурним коефіцієнтом питомого електроопору.

Температурний коефіцієнт питомого електроопору показує, як змінюється питомий опір при зміні температури:

$$\alpha_p = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 \Delta t^\circ}. \quad (8.5)$$

Температурні коефіцієнти для чистих металів завжди більше, ніж для сплавів з цих металів, і близькі до $0,004 \text{ град}^{-1}$. Температурні коефіцієнти сплавів можуть бути дуже малими, а в деяких випадках набувати негативного значення.

Напівпровідники, до яких належать багато хімічних елементів та сполук, займають щодо електропровідності проміжне положення між металами і діелектриками. Діапазон зміни електричного опору напівпровідників надзвичайно широкий ($\rho = 10^{-5} \dots 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Відмінною особливістю напівпровідників від інших матеріалів є значна залежність опору від концентрації і виду домішки, а також від зовнішніх енергетичних впливів: температури, освітленості та ін.

Провідність хімічно чистих напівпровідників називається власною, а самі напівпровідники – власними напівпровідниками. Прикладами таких напівпровідників можуть бути хімічно чистий германій, кремній, селен та ін., а також сполуки PbS, JnSb, GaAs, CdS.

Провідність напівпровідників дуже чутлива навіть до невеликої кількості домішок. Так, введення до кремнію $0,001\%$ бору збільшує його провідність приблизно у 1000 разів. Провідність напівпровідників, зумовлена наявністю домішок, називається домішковою, а напівпровідники – домішковими напівпровідниками.

Для виготовлення напівпровідникових приладів застосовують тільки домішкові напівпровідникові матеріали.

Розглянемо, як впливає температура на електропровідність домішкового напівпровідника. З ростом температури домішкові атоми отримують додаткову енергію, достатню, щоб іонізувати їх. При іонізації домішкових атомів збільшується концентрація носіїв зарядів n і p (рис. 8.1, а), що призводить до зменшення опору напівпровідника.

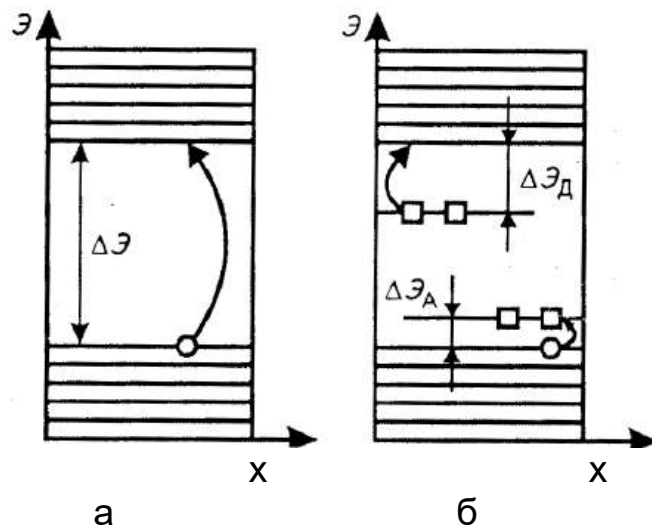


Рис. 8.1. Енергетична діаграма напівпровідника

При подальшому підвищенні температури можна досягти таких значень енергії, при яких виникає власна провідність напівпровідника (рис. 8.1, б). Напівпровідниковий прилад перестає працювати в розрахунковому режимі. Температура, при якій виникає власна провідність, залежить від ширини забороненої зони і обмежує верхню межу робочих температур провідника. Для експоненційних ділянок кривих (у неширокому інтервалі температур) можна прийняти спрощений вираз для залежності питомого опору напівпровідників від температури:

$$\rho = Ae^{\frac{\Delta\mathcal{E}_{np}}{2kT}}, \quad (8.6)$$

де ΔE – ширина забороненої зони; k – постійна Больцмана; T – температура, К; A – константа, що залежить від матеріалу.

Таким чином, у великій кількості напівпровідників з ростом температури спостерігається зменшення електроопору завдяки зростанню концентрації носіїв зарядів. Властивість напівпровідників зі зміною температури значно змінювати опір використовується в термисторах, що є об'ємними напівпровідниковими опорами з великим негативним температурним коефіцієнтом:

$$\alpha_\rho = -\frac{\epsilon}{T^2}; \quad (8.7)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta\mathcal{E}_{np}}{2K} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (8.8)$$

де T_1, T_2 - вихідна і кінцева температури; R_1, R_2 - опір на початку і в кінці температурного діапазону. Температурний коефіцієнт опору напівпровідників не постійний.

Опис установки

У цій роботі для вимірювання опорів провідників і напівпровідників використовується мостова схема вимірювання, яка полягає у визначенні невідомого параметра по трьох відомих.

Три відомих регульованих опорів R_1 , R_2 і R_3 і один невідомий R_x утворюють замкнутий чотирикутник ABCD (рис. 8.2).

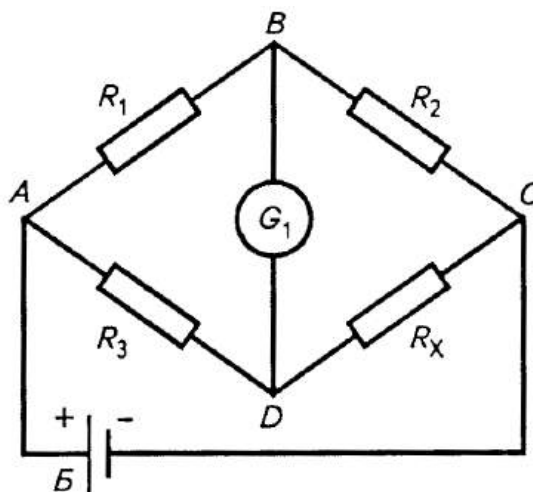


Рис. 8.2. Мостова схема вимірювань

Опори, що утворюють замкнений чотирикутник, називають «плечима» мосту. В одну з діагоналей схеми включається джерело живлення Б, в іншу - гальванометр G_1 .

Змінюючи величину одного або двох опорів моста, можна довести різниці потенціалів на кінцях вимірювальної діагоналі (між точками В і D) до нуля. При цьому струм через гальванометр припиниться і міст буде знаходитися у рівноважному режимі.

Рівність потенціалів точок В і D при рівновазі моста означає, що $R_1R_3 = R_2R_x$, $R_x = R_1R_3 / R_2$.

Завдання

1. Виміряти електроопір провідників і напівпровідників при температурах 20, 40, 60, 80, 100° С.

2. Побудувати графічні залежності електроопору провідників і напівпровідників від температури для розглянутого інтервалу температур $\Delta R / R_1 = f(T)$.

3. Знайти середнє значення температурного коефіцієнта опору α_p для інтервалу температур, що розглядався.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати мостову схему до роботи.

2. Підключити зразки провідників і напівпровідників за допомогою перемикача по черзі до вимірювальних затискачів моста і визначити їх електричний опір при кімнатній температурі. Результати відобразити в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Результати вимірювань

Тип опору	Температура, °С					α_p , град ⁻¹	
	20	40	60	80	100	20 - 60°С	80 - 100°С

3. Включити піч і заміряти опір провідників і напівпровідників при температурах 40, 60, 80 і 100 °С. Дані записати в табл. 8.1.

4. Побудувати графіки $\Delta R / R_1 = f(t)$.

5. Визначити для інтервалів температур 20 - 60°С і 80 - 100°С коефіцієнт α_p для провідників:

$$\alpha_p = \frac{1}{R_1} \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (8.9)$$

і для напівпровідників:

$$\alpha_p = -\frac{T_1}{T_2(T_2 - T_1)} \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (8.10)$$

де R_1 – значення опору (в Ом) при нижній межі температури t_1 і T_1 ; R_2 – значення опору при верхніх межах температури t_2 і T_2 .

Результати розрахунків занести в табл. 8.1.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Коротка характеристика досліджуваних матеріалів.
3. Принципова схема випробування провідникових і напівпровідникових матеріалів.
4. Результати вимірювань опорів провідників і напівпровідників для всіх досліджуваних матеріалів.
5. Графіки $\Delta R / R_1 = f(t)$.
6. Результати обчислень температурного коефіцієнта опору для всіх досліджуваних матеріалів.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні електричні характеристики провідникових і напівпровідникових матеріалів.

2. Що називається питомим опором матеріалу і в яких одиницях він вимірюється?
3. Як поділяють усі матеріали, враховуючи їх поведінку в електричному полі?
4. Яка фізична суть залежності опору провідників від температури?
5. Що називається температурним коефіцієнтом опору і в яких одиницях він вимірюється?
6. У чому полягає фізична суть залежності опору напівпровідників від температури?
7. Охарактеризуйте хімічний склад і структуру досліджуваних матеріалів.
8. Назвіть області застосування досліджуваних матеріалів.

Лабораторна робота № 9

ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧКИ КЮРІ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи

1. Вивчити мостовий метод вимірювання ємності й тангенса кута діелектричних втрат.
2. Визначити залежності ϵ і $\operatorname{tg}\delta$ сегнетоелектрика від температури. Знайти точку Кюрі.
3. Обчислити значення температурного коефіцієнта діелектричної проникності $\alpha\epsilon$.

Загальні відомості

Сегнетоелектриками називають діелектрики, що мають у певному інтервалі температур спонтанну поляризацію.

Сегнетоелектриками можуть бути кристалічні або полікристалічні речовини (сегнетова сіль, метатитанат барію, цирконат свинцю, тверді розчини цирконату і титанатів та ін.).

Сегнетоелектрики мають доменну структуру. Домени являють собою макроскопічні області, що мають спонтанну (мимовільну) поляризацію, яка виникає під впливом внутрішніх процесів, що відбуваються в діелектрику. Напрямок електричних моментів у різних доменів різний, тому сумарна поляризованість зразка може дорівнювати нулю. При впливі зовнішнього електричного поля електричні моменти доменів поступово орієнтуються в напрямку поля, що створює сильну поляризацію і пояснює надвисоке значення діелектричної проникності ($\epsilon \approx 50000$), завдяки чому сегнетоелектрики застосовуються при створенні малогабаритних конденсаторів.

Наслідком доменної будови сегнетоелектриків є нелінійна залежність їх електричної індукції D від напруженості електричного поля E (рис. 9.1). У слабких полях (ділянка I) залежність між D і E лінійна і характеризується оборотним зміщенням меж доменів. В області сильних полів (ділянка II) зміщення доменних меж має незворотний характер, збільшується обсяг доменів, у яких вектор спонтанної поляризації збігається з напрямком поля, і відбувається орієнтація векторів доменів (ділянка III), що підсилює поляризацію. На ділянці IV відбувається насичення процесу поляризації.

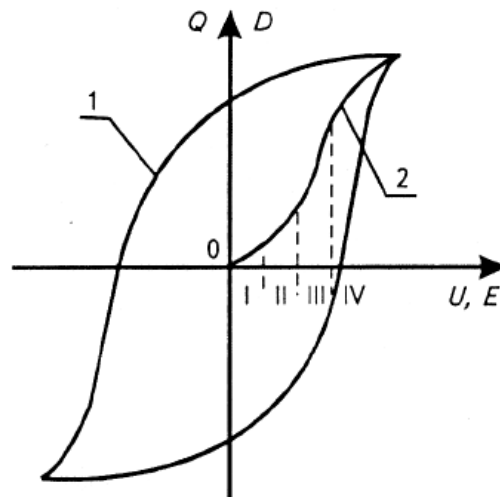


Рис. 9.1. Основна крива поляризації сегнетоелектрика і петля діелектричного гістерезису

Якщо в поляризованому до насичення зразку зменшити напруження поля до нуля, то індукція до нуля не повернеться, а набуде деякого залишкового значення D_r . При впливі поля протилежної поляризованості індукція швидко зменшується і при деякій напруженості поля змінює свій напрям.

Діелектричний гістерезис зумовлений необоротним зміщенням доменних меж під дією поля і свідчить про додатковий механізм діелектричних втрат, пов'язаних з витратами енергії на орієнтацію доменів. Ця властивість сегнетоелектриків дозволяє створювати варіконди – конденсатори, у яких ϵ залежить від напруженості електричного поля. Усі сегнетоелектрики мають яскраво виражений п'єзоефект, що дозволяє використовувати їх для створення ультразвукових генераторів, датчиків тиску, ліній затримки та інших пристроїв.

Потужний механізм поляризації пов'язаний з великими діелектричними втратами, які оцінюють за допомогою тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$.

Специфічні властивості сегнетоелектриків проявляються тільки в певному інтервалі температур. При досягненні певної граничної температури змінюється структура матеріалу, що призводить до руйнування доме-

нів і зникнення сегнетоелектричних властивостей. Таку зміну структури називають фазовим переходом другого роду, а граничну температуру – сегнетоелектричною точкою Кюрі θ_k .

Зв'язок спонтанної поляризації з температурою можна розглянути на прикладі титанату барію $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$. При температурі вище точки Кюрі він має кубічну кристалічну структуру типу «перовскит» (рис. 9.2, а).

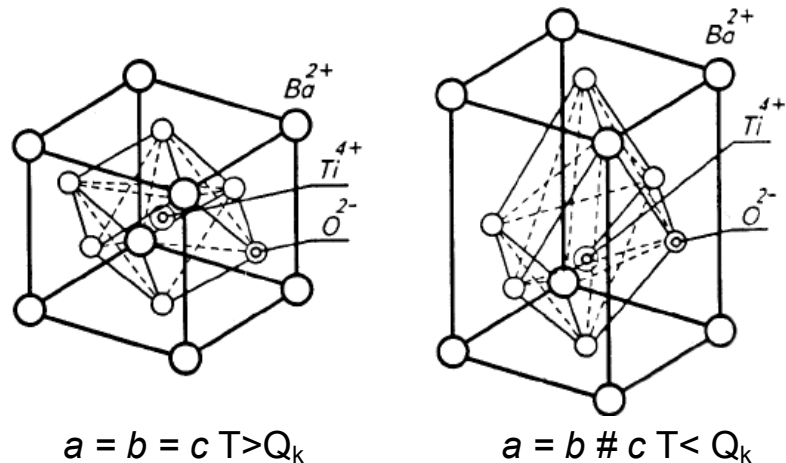


Рис. 9.2. Структура титанату барію $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$

Інтенсивність теплового руху при $T > \theta_k$ достатня для перекидання іона титану від одного іона кисню до іншого. При цьому усереднене у часі положення іона титану збігається з центром елементарної комірки, а її електричний момент дорівнює нулю.

При температурі $T < \theta_k$ енергія теплового руху недостатня для перекидання іона титану від одного іона кисню до іншого. Він локалізується біля одного з іонів кисню. У результаті порушується кубічна симетрія, форма осередку витягується і набуває тетрагональної форми (рис. 9.2, б), а сам осередок – електричного моменту. Взаємодія між зарядженими частинками сусідніх осередків відбувається погоджено, в одному напрямку, що, у свою чергу, призводить до утворення доменів.

Наявність точки Кюрі дозволяє використовувати сегнетоелектрики як датчики температури.

Таким чином, сегнетоелектрики мають ряд характерних особливостей – це:

- 1) висока діелектрична проникність ($\sim 10^2$ - 10^6);
- 2) різка залежність діелектричної проникності від температури;
- 3) різка залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля;
- 4) наявність діелектричного гістерезису;
- 5) різко виражена залежність діелектричної проникності та діелектричних втрат від частоти, особливо в області надвисоких частот;

б) різка зміна при нагріванні або охолодженні (у певному інтервалі температур) теплоємності, температурного коефіцієнта лінійного розширення, модуля пружності.

За типом хімічного зв'язку і за фізичними властивостями сегнетоелектрики поділяються на іонні та дипольні кристали. Іонні кристали мають значну механічну міцність, нерозчинні у воді, мають високу температуру Кюрі, більше значення спонтанної поляризованості. Дипольні кристали мають низьку механічну міцність, добре розчинні у воді, мають точку Кюрі, що набагато нижче кімнатної температури.

Завдання

1. Визначити діелектричну проникність сегнетоелектрика.
2. Зняти показники температурної залежності $\varepsilon = f(T)$ для заданого діелектрика і знайти точку Кюрі.
3. Побудувати температурну залежність діелектричних втрат від температури $\text{tg}\delta = f(T)$.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти геометричні розміри досліджуваного зразка (діаметр і товщину) і підрахувати ємність C_0 аналогічного конденсатора, між електродами якого знаходиться вакуум, за формулою

$$C_0 = \frac{\varepsilon d^2}{4\pi h}, \quad (9.1)$$

де d – діаметр електродів, см; h – товщина зразка, см; ε – діелектрична проникність вакууму ($\varepsilon = 1$).

2. Підрахувати значення діелектричної проникності сегнетоелектрика ε при нормальній температурі:

$$\varepsilon = C_x/C_0, \quad (9.2)$$

де C_x - ємність заданого зразка, виміряна за допомогою вимірювального моста.

3. Помістити зразок у піч, визначити його точку Кюрі, роблячи виміри з інтервалом температур 20°C до початку різкого зростання C_x , а потім стежити за розбалансуванням моста, безперервно знімаючи показання до початку падіння значення C_x . Дані занести в табл. 9.1. Вимірювати $\text{tg}\delta$ тільки на збалансованому мосту.

4. Побудувати залежності $\varepsilon = f(T)$ і $\text{tg}\delta = f(T)$ за результатами вимірювань.

Таблиця 9.1

Результати вимірювань

Матеріал	Температура, °C							α_ε , град ⁻¹	
								20 – 60 °C	80 – 100 °C
C_x									
ε									
$\text{tg}\delta$									

5. Визначити температурний коефіцієнт діелектричної проникності за формулою

$$\alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1(t_2 - t_1)} \quad (9.3)$$

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювань.
3. Короткі відомості про досліджувані матеріали.
4. Результати розрахунків і вимірювань.
5. Графіки $\varepsilon = f(T)$ і $\text{tg}\delta = f(T)$.
6. Значення точки Кюрі та α_ε .
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Які матеріали називають сегнетоелектриками?
2. Які хімічний склад, структура та властивості досліджуваного сегнетоелектрика?
3. Назвіть характерні особливості сегнетоелектриків.
4. Як визначити діелектричну проникність?
5. Що таке сегнетоелектрична точка Кюрі?
6. Назвіть області застосування сегнетоелектриків у техніці.

Лабораторна робота № 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАТЕРІАЛУ ОСЕРДЬ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ

Мета роботи

1. Вивчити резонансний метод дослідження характеристик коливального контуру.
2. Дослідити вплив парамагнітних, діамагнітних і феромагнітних осердь котушки індуктивності на характеристики коливального контуру.

Загальні відомості

Коливальний контур – необхідний елемент кожного передавача і приймача. У передавачах за допомогою коливального контуру можна отримати коливання високої частоти, а в приймачах з усіх сигналів, прийнятих антеною, вибрати сигнал одного передавача.

Коливальний контур складається з котушки індуктивності L і конденсатора C (рис. 10.1).

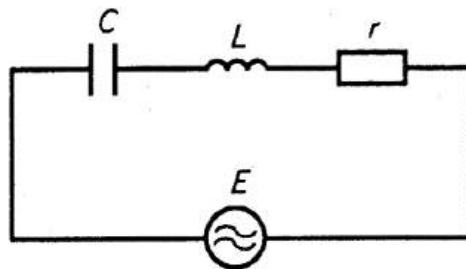


Рис. 10.1. Послідовний коливальний контур

Розрізняють послідовний і паралельний коливальні контури. У послідовному виникає резонанс напруг ($U_C = U_L$), а у паралельному - резонанс струмів ($I_C = I_L$). Основна характеристика коливального контуру є резонансна крива, тобто залежність вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ або струму $I_{\text{вих}}$ у контурі від частоти електричного поля (рис. 10.2).

За резонансною кривою можна судити про вибірковість, добротність і смугу пропускання коливального контуру. Вибірковістю контуру називають властивість коливального контуру виділяти з багатьох сигналів один, частота якого дорівнює резонансній частоті контуру. Добротність контуру Q – це число, що показує, у скільки разів індуктивний опір котушки $X_L = \omega L$ (або

ємнісний опір конденсатора $X_C = 1 / \omega C$) більше активного опору контуру R , тобто

$$Q = \omega L / R \quad (10.1)$$

або

$$Q = 1 / \omega C R. \quad (10.2)$$

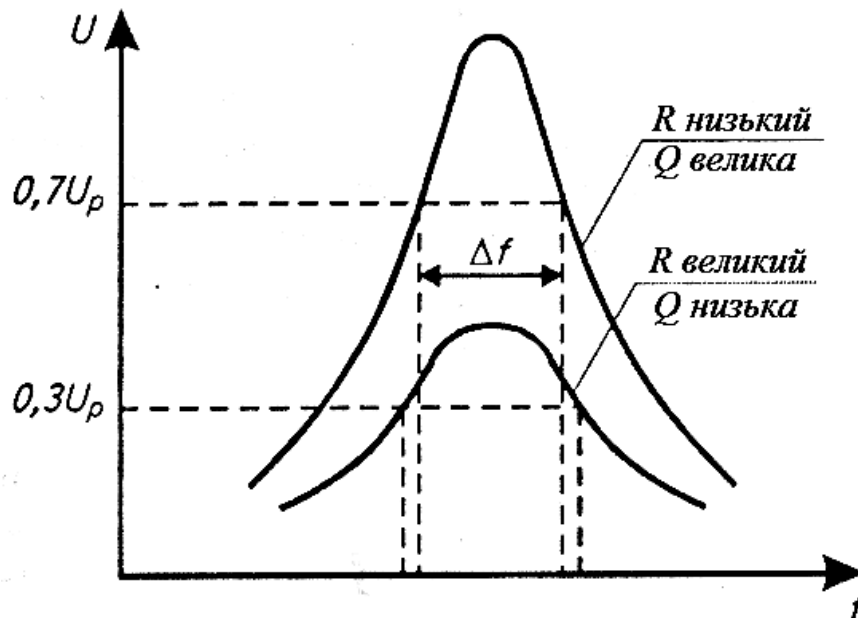


Рис. 10.2. Вплив осердя на параметри контуру

Добротність Q характеризує гостроту резонансної кривої. Чим більше добротність контуру, тим гостріше резонансна крива і довше зберігаються коливання в контурі. У техніці застосовуються контури з добротністю $Q = 50 \dots 200$.

Смугою пропускання контуру називається смуга частот, у межах якої струм або напруга в контурі становить не менше $0,707$ струму або напруги при резонансі. Смуга пропускання контуру залежить від його добротності: чим вона менша, тим більш пологою резонансна крива і ширше смуга пропускання, але тим гірше його вибірковість. Добротність контуру зростає із збільшенням індуктивності L або зменшенням ємності C :

$$Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (10.3)$$

Для зміни параметрів котушок індуктивності в них, зазвичай, вводять осердя з різних матеріалів, що відрізняються один від одного величиною магнітної проникності μ . Відношення індуктивності котушки з осердем L_c до індуктивності котушки без осердя L_0 називається ефективною проникністю: $\mu_{\text{еф}} = L_c / L_0$.

Для виготовлення осердь котушок індуктивності використовують різні матеріали: феромагнетики, діамагнетики і парамагнетики, що відрізня-

ються один від одного здатністю намагнічуватися, а отже, по-різному впливають на магнітне поле котушки.

Феромагнетики – матеріали, в яких $\mu \gg 1$ (порядку сотень або тисяч) і залежить від напруженості магнітного поля. До феромагнетика відносять Fe, Ni, Co та їхні сплави, магнітодіелектрики, ферити.

Магнітодіелектрики отримують шляхом пресування феромагнітного порошку (наприклад, карбонільного заліза або сплаву альсіфер) з ізолюючим органічним або неорганічним зв'язуючим (епоксидною або фенолформальдегідною смолою, поліетиленом і т.п.). У результаті виходить високоомний матеріал, що використовується при високих частотах, оскільки він має малі втрати на вихрові струми. З магнітодіелектриків виготовляють магнітопроводи (осердя котушок індуктивності, стрижні антен, кільця трансформаторів) для високих частот. Якщо зв'язуючим магнітодіелектрика буде якийсь еластичний діелектрик, то цей магнітодіелектрик називається фероеластом. Фероеласта застосовують як магнітні екрани кабелів.

Ферити, або оксіфери, – матеріали, отримані методом керамічної технології з суміші оксидів одно- або двовалентних металів і оксиду заліза Fe_2O_3 . Загальна формула феритів - $MeO \cdot Fe_2O_3$. Порошкоподібні оксиди металів за допомогою сполучної речовини (найчастіше полівінілового спирту) перетворюють у керамічну масу, з якої виготовляють різної форми деталі магнітопроводів у вигляді кілець, стрижнів та ін. Потім заготовки сушать на повітрі, обпалюють у печі з кислим середовищем, щоб уникнути відновлення металів з оксидів. При введенні в котушку індуктивності феритового осердя індуктивність і добротність котушки збільшуються. Феритні осереддя в котушці забезпечують зменшення її ваги на 62%, обсягу до 87%, економію дроту до 60%.

Діамагнетики – матеріали, у яких $\mu < 1$ і не залежить від напруженості магнітного поля. До діамагнетиків відносяться більшість органічних сполук, інертні гази, водень, мідь та її сплави, золото, срібло, ртуть, цинк, вісмут, сурма та інші матеріали.

Присутність у котушці індуктивності діамагнітного осердя призводить до зниження добротності контуру, резонансна крива стає пологою, збільшується ширина смуги пропускання. Цю властивість діамагнетиків використовують у радіотехнічних пристроях, де необхідна широка смуга пропускання. Одним з представників таких діамагнітних матеріалів є латунь (сплав міді та цинку).

У парамагнетиків $\mu > 1$ і не залежить від напруженості магнітного поля. Це – повітря, кисень, окис азоту, солі заліза, нікелю, кобальту, лужні метали, алюміній, платина та ін.

Опис установки і методу дослідження

Лабораторна установка складається з генератора стандартних сигналів (ГСС), коливального контуру і мілівольтметра (рис. 10.3).



Рис. 10.3. Лабораторна установка

Використовується послідовний коливальний контур з конденсаторів змінної ємності та котушкою індуктивності, забезпечений різьбою для введення осередя.

В основу лабораторної роботи покладено метод настроювання контуру в резонанс. За допомогою ГСС на вхід коливального контуру подається напруга $U_{вх}$, постійна за амплітудою і змінна за частотою. По максимуму відхилення стрілки мілівольтметра визначаємо напругу резонансу U_p коливального контуру, а по генератору стандартних сигналів – частоту резонансу f_p .

Змінюючи частоту вхідної напруги вліво і вправо від положення резонансу до напружень на мілівольтметрі, відповідних $0,7U_p$ і $0,3U_p$, знаходимо частоти смуги пропускання f_1 , f_2 , а також f_3 і f_4 (рис. 10.4).

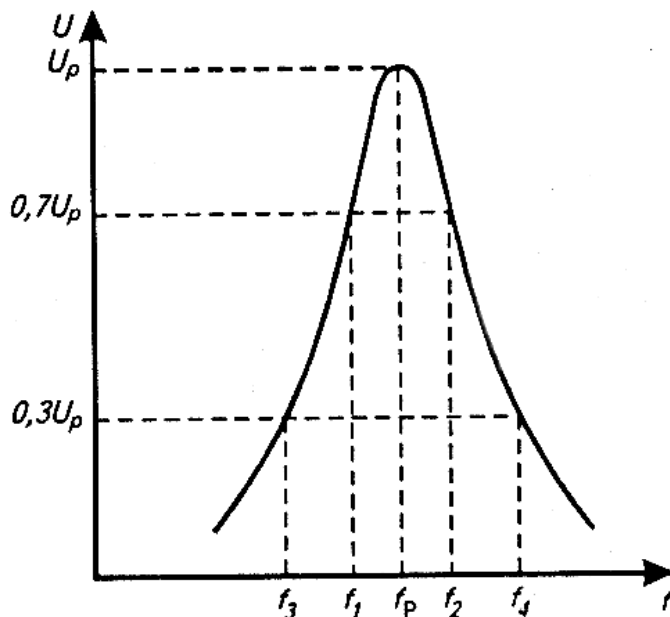


Рис. 10.4. Резонансна крива контуру

Добротність контуру

$$Q = f_p / \Delta f, \quad (10.4)$$

де f_p - резонансна частота, $\Delta f = f_2 - f_1$ - смуга пропускання.

Завдання

1. Побудувати залежності $Y = F(f)$ для всіх осердь, визначаючи Y як відношення $U_{\text{вих}} / U_p$.
2. Обчислити Δf і Q при введенні в котушку індуктивності осердь з діамагнетиками, парамагнетиками і феромагнетиками.
3. Зробити висновок про вплив властивостей цих матеріалів на f_p , Δf , Q коливального контуру.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку і підготувати її до роботи.
2. Налаштувати перемикачем діапазонів і ручкою настроювання частоти генератора стандартних сигналів коливальний контур у резонанс. Значення резонансної частоти f_p і напруги резонансу U_p занести в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

Результати вимірювань

Матеріал осердя	Резонанс		Смуга пропускання				0,3U _p , В	f ₃ , кГц	f ₄ , кГц	Q
	f _p , кГц	U _p , В	0,7U _p , В	f ₁ , кГц	f ₂ , кГц	Δ f, кГц				
1										
2										
3										

3. Визначити частоти f_1 і f_2 , відповідні $U_{\text{вих}} = 0,7U_p$ по обидві сторони від положення резонансу.
4. Визначити частоти f_3 і f_4 на рівні $U_{\text{вих}} = 0,3U_p$.
5. Знайти добротність коливального контуру $Q = f_p / \Delta f$.
6. Повторити дії пп. 2 - 5 для котушки з різними осердями. Матеріал осердя вибрати відповідно до заданого варіанта.

7. Побудувати графіки залежності $Y = F(f)$ для котушок без осердя і з осердям. Для точки резонансу $Y = 1$, для частот f_1 і f_2 - $Y = 0,7$, для частот f_3 і f_4 - $Y = 0,3$.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювань.
3. Загальні відомості про досліджувані матеріали.
4. Таблиця з даними, отриманими в процесі виконання роботи.
5. Графіки залежності $Y = F(f)$ для котушок без осердя і з осердям.
6. Висновок про вплив матеріалу осердя на f_p і Δf .

Контрольні запитання

1. Що називається резонансною кривою?
2. У яких матеріалах магнітне поле наводить магнітний момент, спрямований протилежно вектору зовнішнього магнітного поля?
3. Що таке добротність коливального контуру і шляхи її збільшення?
4. Які матеріали відносяться до діамагнетиків, парамагнетиків і феромагнетиків?
5. Які матеріали зменшують, а які збільшують Δf ?
6. Чому зменшується добротність контуру при введенні в котушку індуктивності діамагнетика або парамагнетика?
7. Що являє собою ферит?
8. Коли виникає резонанс у послідовному коливальному контурі?

Лабораторна робота № 11

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ Й ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи

1. Вивчити резонансний метод визначення діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат.

2. Дослідити частотні залежності діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат.

Загальні відомості

Під впливом електричного поля в діелектриках відбувається поляризація. Поляризація – процес орієнтації й зміщення зв'язаних зарядів під впливом електричного поля. Позитивні заряди зміщуються у напрямку поля, а негативні – проти нього.

Здатність матеріалу до поляризації оцінюється показником відносної діелектричної проникності ϵ , яка обчислюється за формулою

$$\epsilon = C_d / C_0, \quad (11.1)$$

де C_d – ємність конденсатора з даним діелектриком; C_0 – ємність конденсатора у вакуумі.

Відносна діелектрична проникність завжди більше одиниці. Існують декілька механізмів поляризації, вони умовно підрозділяються на миттєві (пружні) та уповільнені (релаксаційні).

Миттєві види поляризації (електронна та іонна) характеризуються малим ($10^{-15} \dots 10^{-13}$ с) часом встановлення (зміщення електричних зарядів), протікають пружно, без втрат електричної енергії.

Уповільнені (релаксаційні) види поляризації (дипольно-релаксаційна, іонно-релаксаційна, електронно-релаксаційна) завжди супроводжуються розсіюванням енергії.

Діелектрик з різними видами поляризації можна замінити еквівалентною схемою, яка являє собою ряд підключених до джерела напруги U конденсаторів (рис. 11.1).

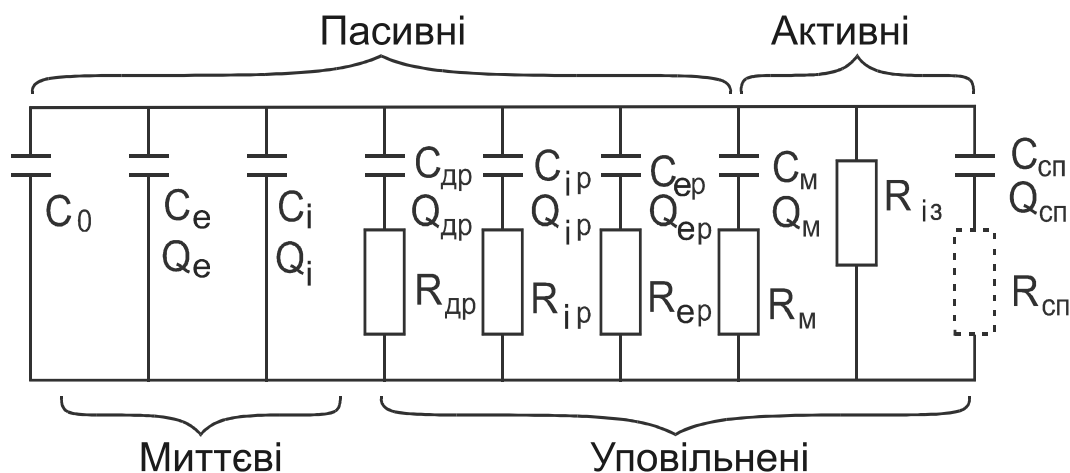


Рис. 11.1. Еквівалентна схема заміщення діелектрика

Ємність C_0 і заряд Q_0 відповідають власному полю електродів, якщо в просторі між ними немає діелектрика. Всі інші значення C і Q характеризують

ють різні механізми поляризації, а опір r є еквівалентом втрат у діелектрику, що знаходиться в змінному електричному полі.

Діелектрична проникність - одна з основних електричних характеристик ізоляційних матеріалів. При виготовленні будь-яких виробів або установок діелектрики вибирають, враховуючи величину їх діелектричної проникності. Так, у виробництві електричних конденсаторів для отримання великих електричних ємностей при малому об'ємі виробів застосовують діелектрики з найбільшими значеннями ϵ . У той же час для ізоляції кабелів і проводів, підкладок мікросхем використовують ізоляційні матеріали з малою діелектричною проникністю, щоб уникнути великих ємностей кабелю і паразитних ємностей зв'язків.

Діелектрична проникність діелектрика визначається хімічною природою, структурою і залежить від температури, вологості матеріалу і частоти зовнішнього електричного поля.

На рис. 11.2 показано частотну залежність діелектричної проникності. З неї випливає, що зі збільшенням частоти ϵ падає. Це пояснюється тим, що різні види поляризації мають певний час релаксації, який стає більше часу дії електричного поля. Час релаксації - це характеристичний час, протягом якого число спочатку орієнтованих частинок зменшується в e разів.

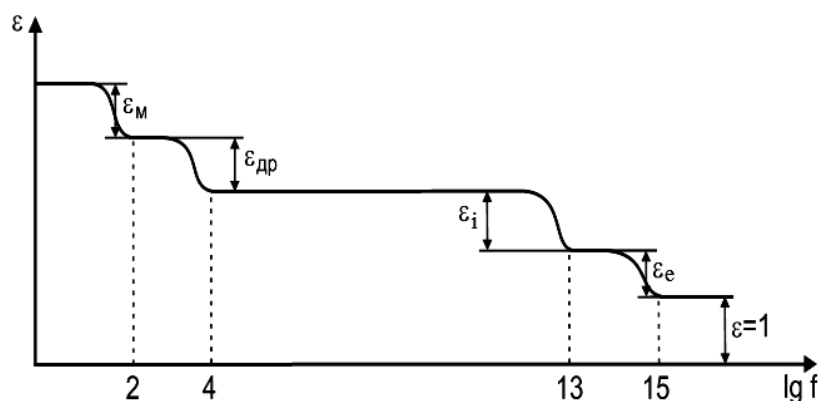


Рис. 11.2. Залежність діелектричної проникності від частоти

Діелектричні втрати – це енергія, що розсіюється в діелектрику при впливі змінного поля і викликає нагрівання матеріалу. Відомо чотири основних види діелектричних втрат:

- 1) наскрізної електропровідності, що обумовлені струмами витоку через наявність у діелектрику невеликого числа вільних зарядів;
- 2) поляризаційні, викликані уповільненими видами поляризації;
- 3) іонізаційні, які виникають при іонізації газоподібних включень у діелектрику при високих значеннях напруженості електричного поля E , що співвідносяться з початком процесу іонізації газу;
- 4) пов'язані з неоднорідністю структури, тобто з наявністю сторонніх провідникових або напівпровідникових домішок (вологи, вуглецю, оксидів заліза і т.п.), що сприяють додатковій електропровідності у діелектриках.

Діелектричні втрати характеризуються або величиною розсіяної потужності P_a , або кутом втрат δ , або його тангенсом $\text{tg}\delta$.

Кутом діелектричних втрат δ називається кут, який доповнює до 90° кут зсуву фаз між струмом і напругою у ємнісному ланцюзі (рис. 11.3). У разі ідеального діелектрика вектор струму в ємнісному ланцюзі буде випереджати вектор напруги на кут 90° , таким чином, $\delta = 0$ (рис.11.3, а). Чим більше розсіяна в діелектрику потужність, тим менше кут зсуву фаз φ і більше кут втрат δ (рис. 11.3, б).

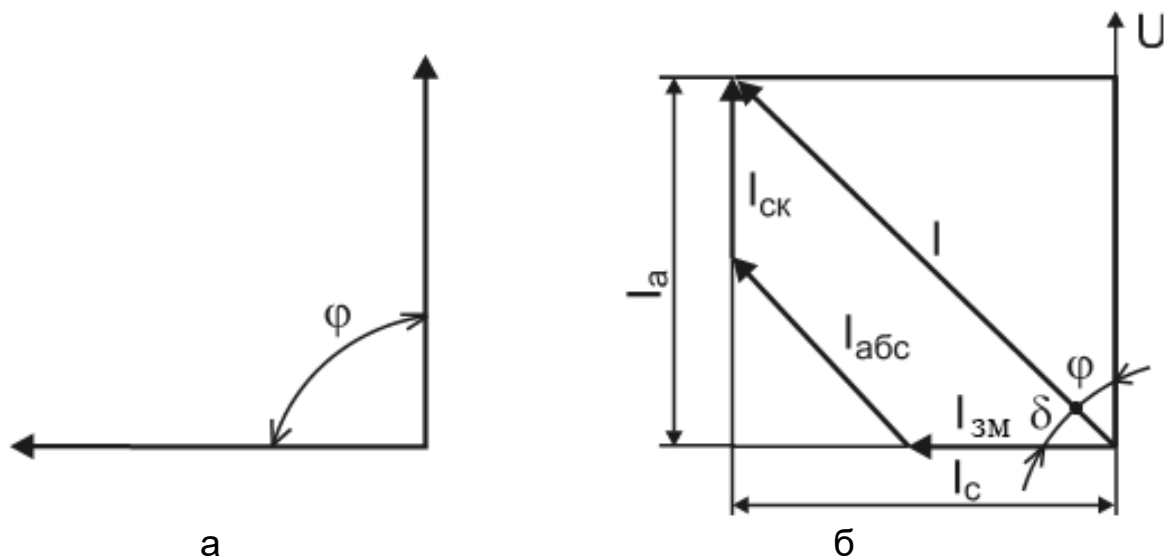


Рис. 11.3. Векторна діаграма ідеального діелектрика (а) і діелектрика з втратами (б)

Діелектричні втрати у діелектрику, що знаходиться у змінному електричному полі, обчислюють за формулою

$$P_a = U^2 \omega C \text{tg}\delta, \quad (11.2)$$

де P_a – потужність, що розсіюється в матеріалі; U – напруга; ω – кутова частота електричного поля; C – ємність.

Величину тангенса кута діелектричних втрат можна визначити, якщо знати активну I_a і реактивну I_p складові струму, що протікає через діелектрик:

$$\text{tg}\delta = I_a / I_p . \quad (11.3)$$

З векторної діаграми (рис.11.3, б) видно, що активна складова повного струму I_a складається з струму наскрізної провідності $I_{ск}$ і активної складової струму абсорбції $I_{абс}$. Ємнісна складова струму I_c дорівнює сумі струму зміщення $I_{см}$ і реактивної складової струму абсорбції $I_{абс}$. Струм наскрізний електропровідності $I_{ск}$ створюється вільними зарядами, які можуть пересуватися порівняно на великі відстані протягом усього часу дії змінного або постійного поля. Струм зміщення $I_{см}$ зумовлений орієнтацією та зміщенням у межах атома, молекули або кристалічної решітки електричних зарядів

при електронній або іонній поляризаціях. Уповільнені види поляризації створюють струм абсорбції $I_{\text{абс}}$.

Подібно до діелектричної проникності, величина $\text{tg}\delta$ також залежить від структури діелектрика, температури, вологості, частоти прикладеної напруги і від інших факторів.

Опис установки

Діелектричну проникність і кут діелектричних втрат визначають на технічних, звукових і радіочастотах. При вимірах на технічних і звукових частотах застосовують, зазвичай, мостові схеми. На високих частотах використовують резонансні методи, засновані на зміні активного і реактивного опорів контуру, налаштованого в резонанс.

У цій лабораторній роботі використовується метод зміни реактивного опору. Він полягає в знятті двох резонансних кривих $U = f(C)$ контура. Спочатку визначають резонансну криву із зразковим конденсатором (рис. 11.4, крива б), а потім знаходять резонанс контуру із зразком матеріалу, який включено паралельно зразковому конденсатору (рис. 11.4, крива а).

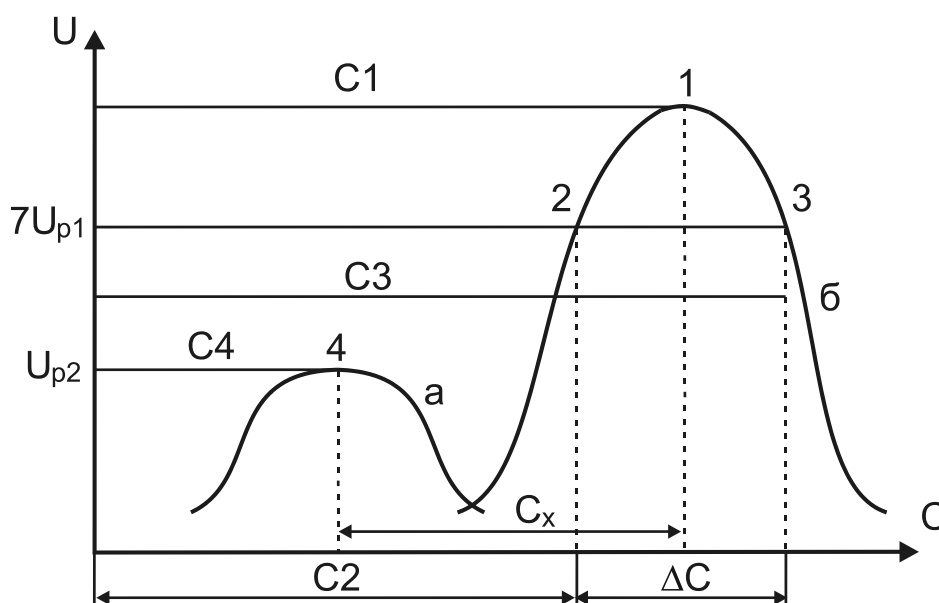


Рис. 11.4. Резонансні криві контури: б - із зразковим конденсатором; а - з досліджуваним зразком

При паралельному підключенні до коливального контуру досліджуваного діелектрика (крива б) резонансна крива змінюється і зміщується по осі частот (рис. 11.4). Якщо коливальний контур без діелектрика має власну резонансну частоту f_p , то при підключенні до нього діелектрика, внаслідок внесення додаткової ємності, резонансна крива зміниться і буде дорівнювати f_p' (крива а). При цьому смуга пропускання контуру за рівнем

$0,7U_p$ розшириться, а максимальне значення вихідної напруги зменшиться на величину $U = U_{p1} - U_{p2}$.

Щоб визначити максимальну напругу в контурі з діелектриком при тій самій частоті поля, необхідно основну ємність зменшити на величину C_x , тобто застосувати метод заміщення ємності. Величина ΔC відповідає смузі пропускання контуру, вираженої в одиницях ємності.

Значення ϵ і $\text{tg}\delta$ досліджуваного зразка знаходять, враховуючи зміну параметрів резонансної кривої.

Блок-схему вимірювальної установки зображено на рис. 11.5.

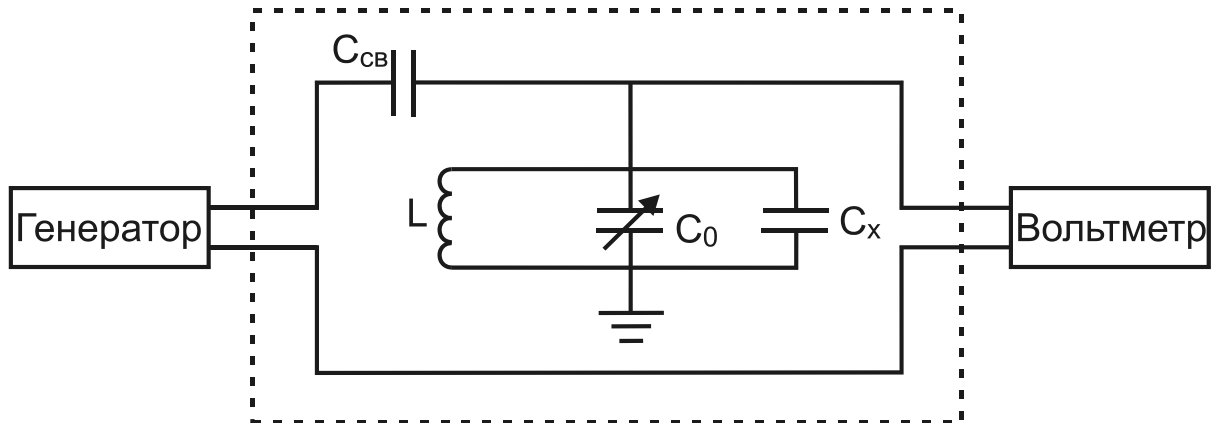


Рис. 11.5. Блок-схема установки

Блок вимірювального контуру складається з конденсатора змінної ємності C_0 , ємності зв'язку $C_{св}$, змінних котушок індуктивності L і конденсатора C_x із зразком діелектрика, що випробовується.

Змінні котушки індуктивності, змінюючи власну частоту контуру, дозволяють зняти частотну залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ досліджуваного діелектрика.

Напруга на вхід блоку вимірювального контуру подається з генератора стандартних сигналів. На виході підключений ламповий вольтметр, за допомогою якого вимірюються діючі значення змінної напруги.

Завдання

1. Визначити діелектричну проникність й тангенс кута діелектричних втрат для кожного діапазона частот.
2. Побудувати графіки залежностей $\epsilon = F(f)$ і $\text{tg}\delta = F(f)$.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати вимірювальну установку до роботи (порядок підготовки вказаний на робочому місці).
2. Включити одну з котушок індуктивності перемикачем блоку вимірювального контуру.

3. Поставити конденсатор змінної ємності C_1 у середнє положення за шкалою лімба. У табл. 11.1 занести значення кута повороту верньєра конденсатора α_1 .

4. Встановити повітряний зазор h між електродами конденсатора C_x , який дорівнює товщині досліджуваного діелектрика.

5. Змінюючи частоту генератора, добитися резонансу системи по максимальній напрузі на вольтметрі. Занести значення резонансної частоти f_p і напруги U_p до табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Результати вимірювань

Котушка індуктивності	Резонансна частота f_p , кГц	Без зразка					Зі зразком	
		α_1 , град	U_{p1} , В	$0,7U_{p1}$, В	α_2 , град	α_3 , град	α_4 , град	U_{p2} , В

6. Визначити напругу, що дорівнює $0,7U_{p1}$, і показники занести до табл. 11.1.

7. Змінюючи ємність конденсатора поворотом ручки вліво від положення при резонансі, встановити значення $0,7U_{p1}$. Величину кута α_2 занести в табл. 11.1.

8. Поворотом ручки вправо від положення резонансу знову встановити значення $0,7U_{p1}$. Величину кута α_3 занести в табл. 11.1.

9. Встановити досліджуваний діелектрик між обкладинками конденсатора. Налаштувати контур у резонанс, змінюючи ємність змінного конденсатора (рис. 11.4, крива б). Значення напруги резонансу U_{p2} і α_4 занести до табл.11.1.

10. Використовуючи графік (див. графік на робочому місці), перевести значення кутів у значення ємності й занести у табл.11.2.

Таблиця 11.2

Результати вимірювань

Котушка індуктивності	C_1	C_2	C_3	C_4	$\Delta C = C_2 - C_3$	$C_x = C_1 - C_4$	$\Delta U = U_{p1} - U_{p2}$	ϵ	$\text{tg} \delta$

11. Повторити дії пп. 3 - 10 для решти змінних котушок індуктивності.

12. Обчислити значення ε і $\operatorname{tg}\delta$ для досліджуваного зразка за формулами

$$\varepsilon = 14,4 \frac{C_x h}{d}, \quad (11.4)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\Delta C \Delta U}{2C_x U_{p2}}, \quad (11.5)$$

використовуючи величини C_x , ΔC і ΔU_p , отримані в ході експерименту і наведені в табл. 11.2. У формулі (11.4) h і d - товщина і діаметр зразка, см.

13. Побудувати графіки залежності ε і $\operatorname{tg}\delta$ від частоти прикладеної напруги.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Блок-схема вимірювальної установки.
3. Загальні відомості про досліджуваний діелектрик.
4. Результати вимірювань і обчислень (див. табл. 11.1 і 11.2).
5. Графіки залежностей $\varepsilon = F(f)$ і $\operatorname{tg}\delta = F(f)$.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. В чому полягає суть процесу поляризації?
2. Як оцінюється здатність діелектрика поляризуватися?
3. Яке призначення окремих елементів еквівалентної схеми діелектрика з різними механізмами поляризації?
4. Які механізми поляризації присутні у досліджуваному діелектрику?
5. Назвіть механізми діелектричних втрат у досліджуваному діелектрику.
6. Поясніть хід залежностей $\varepsilon = F(f)$ і $\operatorname{tg}\delta = F(f)$.
7. Що називається кутом діелектричних втрат?
8. Поясніть суть резонансного методу визначення ε і $\operatorname{tg}\delta$.

Лабораторна робота № 12

ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи

1. Вивчити метод і конструкцію приладу для визначення мікротвердості.
2. Навчитись визначати мікротвердість окремих структурних складових сплаву.

3. Дослідити особливості зон хімічної та структурної неоднорідностей методом мікротвердості.

Загальні відомості

Вимірювання твердості різних матеріалів - один з найбільш легко і швидко виконуваних видів механічних випробувань. Випробування на твердість широко застосовується не тільки як засіб контролю якості матеріалів, але і як засіб дослідження фазових і структурних перетворень.

Таке дослідження з найбільшим успіхом може виконуватися шляхом вимірювання твердості окремих структурних складових, тобто вимірювання мікротвердості. Під мікротвердістю, таким чином, слід розуміти твердість матеріалу в його мікроскопічних обсягах.

Метод вимірювання мікротвердості добре поєднується з вивченням мікроскопічної будови матеріалу. Він дозволяє досліджувати дрібні деталі приладів, тонкі металеві стрічки, фольгу, дріт, металеві нитки, тонкі шари гальванічних покриттів, тонкі поверхневі шари металів, властивості яких змінюються при механічній обробці, терті та іншому впливі. Широко використовується метод мікротвердості для дослідження окремих фаз сплавів.

У радіоелектроніці широко застосовуються напівпровідникові матеріали. Найбільш надійним методом визначення механічних властивостей напівпровідникових матеріалів, що мають значну крихкість, є метод мікротвердості. З його допомогою можна вивчати анізотропію властивостей кристалів кремнію і германію, а також контролювати ступінь гомогенізації синтезованих сполук, таких, як InAs, GaAs та ін.

Для випробування на мікротвердість застосовують прилад ПМТ-3. Як інденатор використовують алмазну піраміду з квадратною основою і кутом при вершині між протилежними гранями 136° . При визначенні мікротвердості використовуються навантаження від 5 до 500 г (0,049-4,9 Н). Діагональ отриманого відбитка вимірюють окулярним мікрометром.

Конструкція приладу ПМТ-3

Прилад має масивний штатив, що забезпечує йому велику стійкість.

Підстава 1 (рис.12.1) приладу має стійку 2, по якій гайкою 3 при ослабленому гвинті 4 можна переміщати кронштейн 5 з тубусом 6 мікроскопа. Кронштейн 5 має напрямні, по яких можна переміщати тубус 6. Грубе переміщення тубуса 6 здійснюється обертанням гвинта 7 (макроподачі), а мале переміщення - обертанням гвинта 8 (мікроподачі). Тубус має похилу трубку з окуляром 9 і об'єктив 10. До тубуса прикріплений механізм навантаження 11 з алмазним наконечником 12, це чотиригранна алмазна піраміда з кутом при вершині 136° .

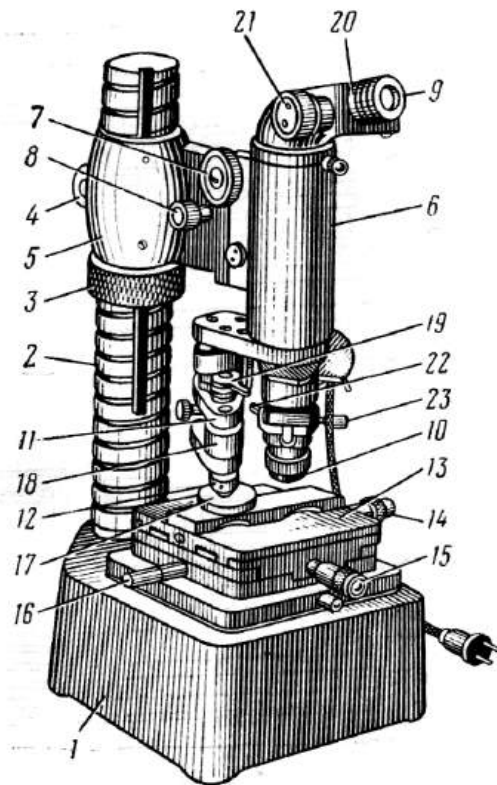


Рис. 12.1. Прилад ПМТ-3

На підставі 1 розташовано предметний столик 13, верхню частину якого за допомогою гвинтів 14 і 15 можна переміщати в двох взаємно перпендикулярних напрямках (координатне переміщення) і рукояткою 16 повертати навколо осі приблизно на 180° від одного упору до іншого (напівкруговим переміщенням). На столик 13 встановлюють зразок 17. Для навантаження застосовують спеціальні вантажі у формі шайб з вирізом вагою 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 і 500 г. При випробуванні один з вантажів (шайба 18) встановлюють вирізом на шток навантажувального механізму. Вдавлювання алмазної піраміди 12 у зразок 17 під дією вантажу, що знаходиться на штоку, здійснюється при повороті рукоятки 19 приблизно на півоберта. Діагональ отриманого відбитка вимірюють окулярним мікрометром 20.

Підготовка зразків для випробування

Поверхня зразка має бути підготовлена так само, як для металографічного дослідження, тобто слід приготувати мікрошліф. Зразки стрічки і фольги досліджують без підготовки.

Методика проведення випробувань

1. Встановити і закріпити притискними лапками зразок на предметному столику 2 під об'єктивом 3. Столик має бути повернений у крайнє праве положення до упору.

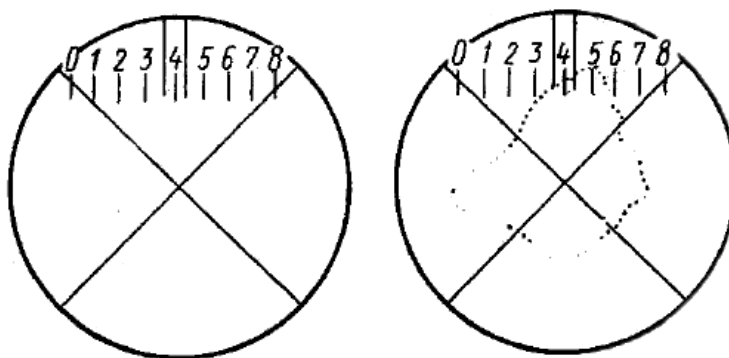
2. Навести на фокус поверхню зразка обертанням гвинтів 7 і 8 макроподачі та мікроподачі.

3. Обертанням барабана 21 встановити перехрестя ниток окулярного мікрометра у центр поля зору на поділ 4 шкали (рис. 12.2).

4. Вибрати на зразку місце для нанесення відбитку і підвести його переміщенням столика гвинтами 14 і 15 під перехрестя ниток.

5. Вибрати вантаж і помістити його на шток навантажувального механізму.

6. Повернути рукояткою 16 предметний столик у крайнє ліве положення до упору. Повертати треба обережно, без удару об упор, щоб не змістити зразок.



а

б

Рис. 12.2. Розташування подвійного штриха окулярного мікрометра у центрі поля зору на розподілі 4 шкали (а); розташування вибраного для нанесення відбитка місця на зразку під перехрестям ниток (б)

7. Провести вдавнення алмазної піраміди, для чого повільно і рівномірно повернути на себе рукоятку 19.

8. Дати витримку 8 с.

9. Зняти навантаження, для чого рівномірно повернути від себе рукоятку 19.

10. Повернути рукояткою 16 предметний столик навколо осі у крайнє праве положення до упору. Повертати треба обережно без удару об упір, щоб не змістити зразок.

11. Виміряти окулярним мікрометром діагональ отриманого відбитка.

Вимірювання довжини діагоналі відбитка

1. Перехрестя приладу розташувати праворуч від відбитка (рис. 12.3, а).

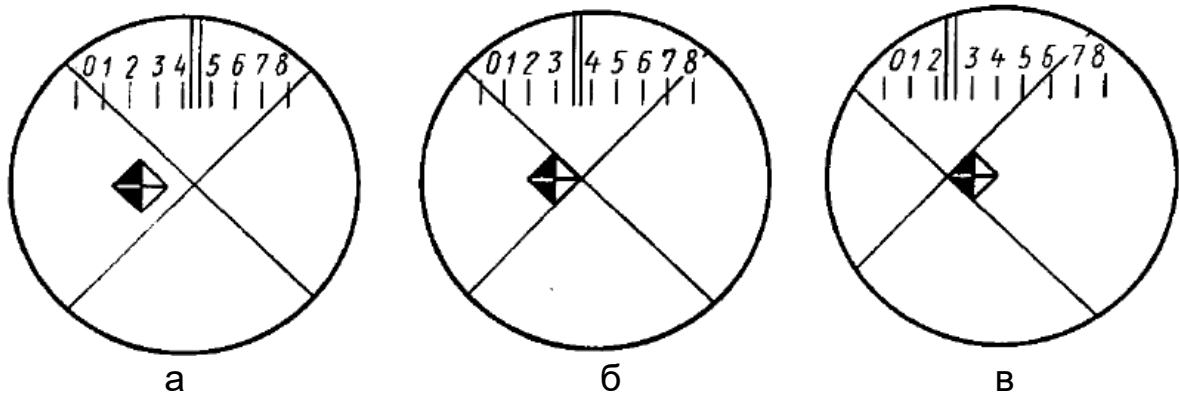


Рис. 12.3. Приклад вимірювання довжини діагоналі окулярним мікрометром

2. Обертанням барабана 21 окулярного мікрометра 20 (див. рис.12.1) лівий кут перехрестя підвести (справа наліво) до правого кута відбитка (рис.12.3, б) так, щоб товщина ниток залишалася вправо від контуру відбитка.

3. Провести відлік показань шкали і лімба барабана окулярного мікрометра: спостерігаючи в окуляр, визначити, між якими цифрами шкали розташувався подвійний штрих, тобто перехрестя ниток (цифра, розташована ліворуч від подвійного штриха, показує сотні), до цього числа додати показання лімба барабана. Отриманий результат записати в графу 2 протоколу випробування.

Наприклад, подвійний штрих знаходиться між 3 і 4 (рис.12.3, б), що відповідає числу 300, а на лімбі барабана число 56; тоді сума буде $300 + 56 = 356$.

4. Обертанням барабана окулярного мікрометра правий кут ниток підвести до лівого кута відбитка (рис.12.3, в).

5. Провести відлік показань шкали і лімба барабана окулярного мікрометра; спостерігаючи в окуляр, визначити, між якими цифрами розташований подвійний штрих, тобто перехрестя ниток (цифра, розташована ліворуч від подвійного штриха, показує сотні), до цього числа додати показання лімба барабана. Отриманий результат записати в табл. 12.1. Наприклад, подвійний штрих знаходиться між цифрами 2 і 3 (рис.12.3, в), що відповідає числу 200, а на лімбі барабана число 26; тоді сума буде $200 + 26 = 226$.

6. З першого числа (356) відняти друге число (226), отримана різниця ($356 - 226 = 130$) вказує довжину діагоналі відбитка; у цьому випадку довжина діагоналі відбитка дорівнює 130 поділкам лімба барабана окулярного мікрометра. Отриманий результат записати в табл. 12.1.

7. Визначити довжину діагоналі відбитка в мікронах; для цього отриману довжину діагоналі відбитка в поділках (у цьому випадку 130 поділок)

помножити на ціну одної поділки (в мікрометрах). Оскільки ціна одної поділки лімба барабана окулярного мікрометра дорівнює 0,3 мкм, то отриману довжину діагоналі відбитка в поділках (в нашому випадку 130 поділок) треба помножити на 0,3 (130 x 0,3 = 39 мкм). Отриманий результат (в мкм) записати в табл. 12.1.

Визначення твердості

Число твердості H визначається за формулою

$$H = 1,8544P / d^2, \text{ МПа,}$$

де P - навантаження на піраміду, Н; d - середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм.

Щоб не обчислювати твердість за наведеною вище формулою, ГОСТ 9450 передбачено спеціальні таблиці (таблиця на робочому місці), розраховані на навантаження: 5, 10, 20, 50, 100, 200 і 500 г.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати зразки для визначення мікротвердості.
2. Підготувати прилад ПМТ-3 до роботи.
3. Провести випробування на мікротвердість різних зразків, результати занести в табл. 12.1.
4. Дослідити розподіл мікротвердості в зоні структурної та хімічної неоднорідності.

Таблиця 12.1

Результати вимірювань

Номер вимірювання	1-й відлік	2-й відлік	Довжина діагоналі відбитка, дел.	Довжина діагоналі відбитка, мкм	Число твердості H_{μ}

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Загальні відомості про досліджувані матеріали.
3. Таблиця з результатами визначення мікротвердості.
4. Залежність розподілу мікротвердості в зоні хімічної та структурної неоднорідності.
5. Висновки

Контрольні запитання

1. У чому полягає метод вимірювання мікротвердості?
2. У яких випадках застосовується метод вимірювання мікротвердості?
3. Як визначити показник мікротвердості?

Лабораторна робота №13

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОСЦИЛОГРАФА

Мета роботи

1. Ознайомитись з методом побудови основної кривої намагнічування феромагнетиків і визначення магнітних втрат.
2. Дослідити зміну основних характеристик магнітних матеріалів залежно від напруженості й частоти поля.

Загальні відомості

В техніці феромагнетики використовують як магнітні матеріали для виготовлення магнітних осердь (магнітопроводів) і постійних магнітів. Застосування феромагнетиків визначається їхніми магнітними властивостями, які характеризуються залежністю магнітної індукції B або намагніченості I від напруженості поля H і втрат на перемагнічування P від індукції й частоти.

До феромагнетиків відносять речовини з магнітною проникністю $\mu \gg 1$, яка дуже залежить від напруженості магнітного поля. Феромагнетикам притаманна внутрішня магнітна упорядкованість, що виражається в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів.

Властивості феромагнетиків обумовлені їхньою доменною будовою.

Домени – макроскопічні області, намагнічені практично до насичення навіть у відсутності магнітного поля. Лінійні розміри доменів - від тисячних до десятих часток міліметра. Домени розділені між собою доменними межами (розмірами в декілька сотень міжатомних відстаней). У межах границі відбувається поступова зміна орієнтації магнітних моментів. Залежність магнітної індукції феромагнетика від напруженості зовнішнього

магнітного поля називають кривою намагнічування. Для отримання кривих намагнічування як вихідний приймають розмагнічений стан зразка, що характеризується нульовою індукцією і відсутністю переважного напрямку намагнічування доменів.

При намагнічуванні зразка розрізняють такі типи залежності:

- а) початкову криву намагнічування з монотонним збільшенням H ;
- б) безгістерезисну криву намагнічування, одержувану при одночасній дії постійного і змінного полів із спадною до нуля амплітудою;
- в) основну криву намагнічування, що являє собою геометричне місце точок вершин петель гістерезису при циклічному перемагнічуванні в змінному полі (рис.13.1).

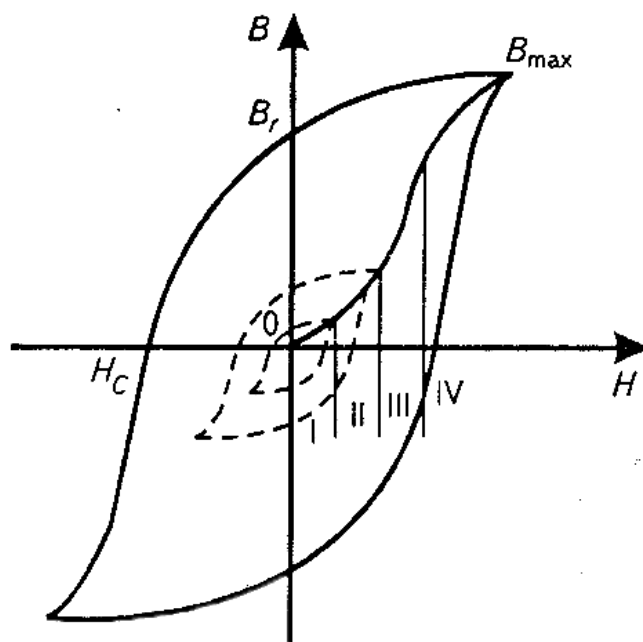


Рис. 13.1. Гістерезисний цикл перемагнічування

При циклічному перемагнічуванні крива намагнічування має вигляд петлі гістерезису. Форма петлі для певного виду матеріалу залежить від напруженості H . Для слабких полів вона еліпсоподібна, для більш сильних полів у неї витягуються «носики».

У процесі намагнічування зразка (рис.13.1) основну роль відіграють два процеси: зміщення доменних меж і повороту магнітних моментів доменів у напрямку зовнішнього поля.

В області слабких полів (ділянка I) відбувається обертовий зсув доменних меж. При цьому збільшується обсяг доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком магнітного поля.

У більш сильних полях (ділянка II) зміщення доменних меж носить незворотний стрибкоподібний характер.

При подальшому збільшенні H (ділянка III) магнітні моменти доменів поступово повертаються в напрямку поля.

Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються уздовж поля, настає технічне насичення намагніченості. Незначне зростання індукції на ділянці насичення зумовлено збільшенням намагніченості домена (рис. 13.2).

При намагнічуванні матеріалу до насичення B_s і подальшого зняття зовнішнього магнітного поля індукція до нуля не повернеться, а набуде деякого значення B_r , це так звана залишкова індукція.

Щоб зменшити індукцію від значення B_r до нуля, необхідно докласти магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість розмагнічувального поля H_c , при якому індукція у феромагнетика, попередньо намагніченому до насичення, повертається до нуля, називається коерцитивною силою. Вибіраючи різні амплітуди напруженості магнітного поля, отримують сімейство петель гістерезису.

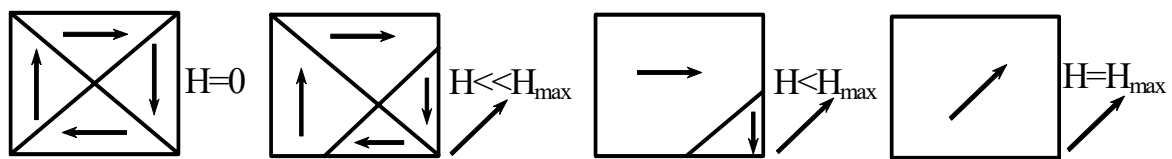


Рис. 13.2. Орієнтація магнітних моментів доменів при намагнічуванні

Петля гістерезису, що відповідає індукції насичення B_s , називається граничною. Гранична петля гістерезису визначає основні магнітні параметри: B_s , B_r і H_c .

Сукупність вершин петель гістерезису утворює основну криву намагнічування феромагнетика. Основна крива намагнічування для магнітом'яких матеріалів практично не відрізняється від початкової кривої. З кривої намагнічування феромагнетика легко побудувати залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля (рис. 13.3). Магнітна проникність дорівнює

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \operatorname{tg} \alpha \quad (13.1)$$

і пропорційна тангенсу кута нахилу січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування.

На графіку залежності $\mu = F(H)$ виділяють початкову магнітну проникність μ_H , відповідну ділянці I, і максимальну μ_{max} .

Перемагнічування феромагнетиків у змінних полях супроводжується втратами енергії, що спричиняє нагрівання матеріалу.

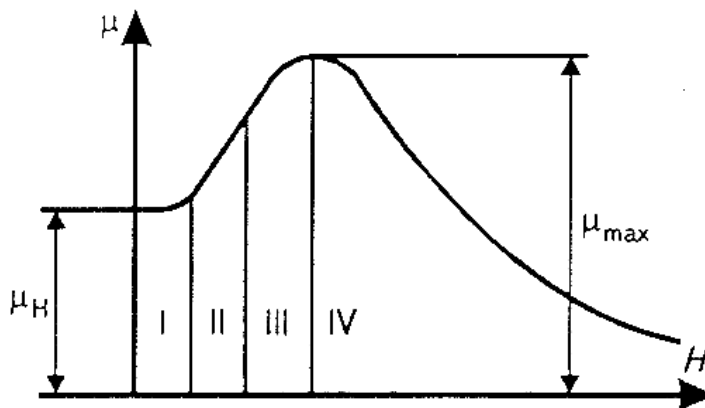


Рис. 13.3. Залежність $\mu = F(H)$

Магнітні втрати є важливою характеристикою матеріалу і складаються з втрат на гістерезис P_H , вихрові струми $P_{в.т}$ і на магнітну післядію (на магнітну в'язкість) $P_{пос}$

$$P = P_H + P_{в.т} + P_{пос}. \quad (13.2)$$

Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування, віднесені до одиниці об'єму речовини, визначаються площею петлі гістерезису, Дж / м³:

$$P_H = \oint H dB. \quad (13.3)$$

Зазвичай їх розраховують за емпіричною формулою

$$P_H = \eta B_{max}^2 f V, \quad (13.4)$$

де η – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу; B_{max} – максимальна індукція у певному циклі; f – частота; V – об'єм зразка.

Втрати на гістерезис обумовлені необоротними процесами перемагнічування.

Втрати на вихрові струми визначають за емпіричною формулою

$$P_b = \xi f^2 B_{max}^2 V = \frac{1,64 d^2 f^2 B_{max}^2}{\gamma \rho}, \quad (13.5)$$

де ξ - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу; γ - густина матеріалу; d - товщина матеріалу; ρ - питомий електроопір.

Найбільш істотні у змінних полях втрати на вихорові струми, які залежать від частоти поля в другому ступені. Для їх зменшення необхідно

використовувати магнітний матеріал з підвищеним питомим опором або збирати осердя з тонких листів, ізольованих один від одного.

Втрати на післядію обумовлені відставанням магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля. Внеском втрат на післядію в механізмі розігріву феромагнетика зазвичай можна знехтувати.

Магнітні матеріали, що застосовуються в електронній техніці, підрозділяють на два основних класи: магнітом'яккі та магнітотверді.

До магнітом'яких відносять магнітні матеріали з малою коерцитивною силою і високою магнітною проникністю. Вони легко перемагнічуються, характеризуються вузькою петлею гістерезису і малими втратами на перемагнічування. Їх використовують в основному як магнітопроводи: осердя дроселів, трансформаторів, електромагніти, магнітні системи електровимірвальних приладів і т.п.

До магнітотвердих відносять матеріали з великою коерцитивною силою. Вони можуть перемагнічуватися тільки в дуже сильних магнітних полях. Ці матеріали використовують в основному для виготовлення постійних магнітів.

Умовно магнітом'якими вважають матеріали, в яких $H_c < 800 \text{ A / м}$, а магнітотвердими – з $H_c > 4 \text{ кА / м}$. У кращих магнітом'яких матеріалах (карбонільне залізо, альсифер, пермаллой) $H_c < 1 \text{ A / м}$, а у кращих магнітотвердих матеріалах (SmCo_5) $H_c > 500 \text{ кА / м}$.

Опис методу дослідження

Для вивчення магнітних властивостей феромагнетиків використовують замкнуті зразки тороїдальної форми (рис. 13.4), оскільки в них істинна напруженість магнітного поля всередині зразка відповідає напруженості зовнішнього магнітного поля.

Установка складається із звукового генератора ЗГ, що подає на первинну обмотку n_1 зразка 2 змінний струм певної частоти, і осцилографа З. У вторинній обмотці n_2 індукується ЕРС, зрушена у часі відносно напруги в первинній обмотці на кут, що дорівнює 90° . Щоб до пластин вертикального відхилення подати напругу, пропорційну магнітній індукції без зсуву в часі, у вторинну обмотку включають фазозсувальний ланцюжок r_2, C . Таким чином, на екрані осцилографа формується гістерезисний цикл.

Завдання

1. Зняти показники для побудови основних кривих намагнічування феромагнетика на трьох різних частотах f і побудувати графіки $B = F(H)$, $\mu = F(H)$.

2. Побудувати графік залежності μ від частоти f при деякому фіксованому значенні напруженості поля $H = \text{const}$, використовуючи сімейство кривих $\mu = F(H)$.

3. Обчислити втрати і подати їх у вигляді графіків $P = F(f)$, $P_1 = F(f)$.

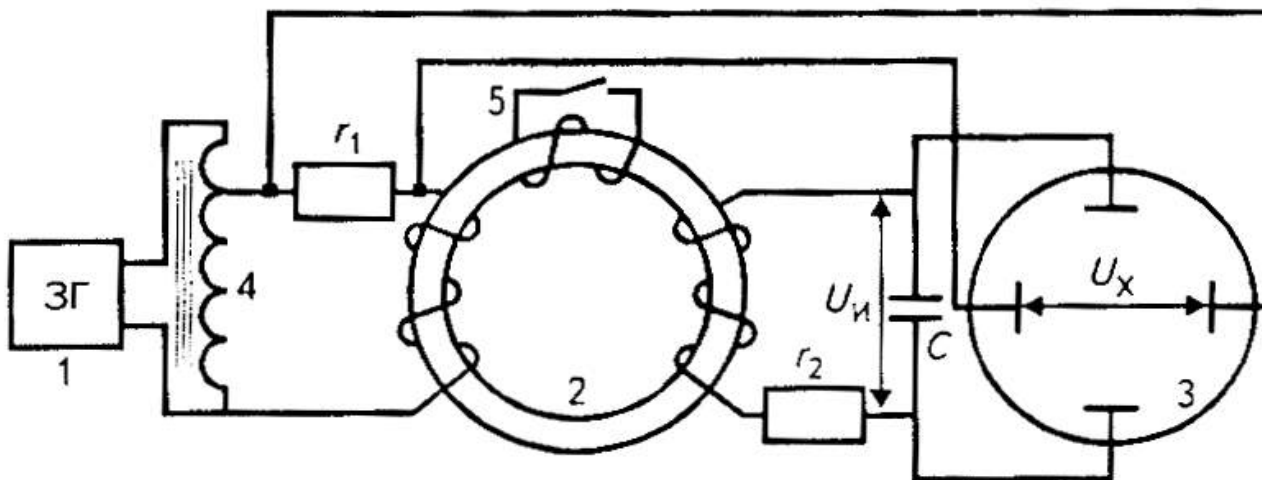


Рис. 13.4. Схема вимірювальної установки

Порядок виконання роботи

1. Підготувати установку до роботи.

2. Визначити масштаби по осях x і y осцилографа. Від'єднати входи x і y осцилографа від досліджуваної схеми. Подати від спеціального трансформатора напругу 2,4 В по черзі на входи x і y осцилографа і виміряти у міліметрах довжину променів l_x і l_y на екрані. Масштаби по осях h_x і h_y розрахувати за формулами:

$$h_x = \frac{7,52 \cdot 10^{-3} n_1}{r_1 d_{cp} l_x}, \quad (13.6)$$

$$h_y = \frac{2,4 \cdot 10^8 C r_2}{n_2 S_0 l_y}. \quad (13.7)$$

Значення n_1 , n_2 , r_1 , r_2 , d_{cp} , S_0 , C наведено на робочому місці.

Зняти основні криві намагнічування зразка для трьох частот, що задані викладачем.

Для заданої частоти отримати при максимальному напруженні виходу генератора петлю гістерезису, замалювати її на кальці й, визначивши площу S_n , записати в табл. 13.1. Встановити нульову напругу виходу генератора і, поступово підвищуючи напругу, спостерігати на екрані осцило-

графа не менше п'яти петель гістерезису. Координати x_i і y_i вершин петель гістерезису занести в табл.13.1.

Таблиця 13.1

Результати вимірювань

Матеріал															
Частота, Гц	$f_1=$					$f_2=$					$f_3=$				
Площа петлі гістерезису, мм ²	$S_{n1}=$					$S_{n2}=$					$S_{n3}=$				
Параметри петлі	x_i	H	y_i	B_i	μ_i	x_i	H	y_i	B_i	μ_i	x_i	H	y_i	B_i	μ_i

- Обчислити значення $H_i = x_i h_x$, $B_i = y_i h_y$, $\mu_i = B_i / H_i$ і записати в табл.13.1.
- Побудувати криві $B = F(H)$, $\mu = F(H)$ для трьох частот.
- Побудувати залежність $\mu = F(f)$, вибравши довільно значення $H = \text{const}$ з сімейства кривих $\mu = F(H)$.
- Обчислити магнітні втрати за період

$$P = \frac{S_n h_x h_y}{10^6 \rho} \quad (13.8)$$

і за секунду

$$P_1 = P f. \quad (13.9)$$

Подати у графічному вигляді залежність $P = F(f)$, $P_1 = F(f)$.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема установки.
3. Короткі відомості про досліджувані матеріали.
4. Таблиця вимірювань і обчислень.

Контрольні запитання

1. Основні характеристики магнітних матеріалів.
2. Класифікація і призначення магнітних матеріалів.
3. Назвіть види магнітних втрат.
4. Як зменшити втрати на вихрові струми?
5. Які хімічний склад і структура досліджуваного матеріалу?
6. Назвіть галузі застосування досліджуваного феромагнетика.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы [Текст] : учеб. для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 567 с.

Материаловедение [Текст] : учеб. для вузов / под общ. ред. Б. М. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1985. – 384 с.

Пасынков, В. В. Материалы электронной техники [Текст] : учеб. для вузов / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высш. шк., 1986. – 367 с.

Лахтин, Ю. М., Материаловедение [Текст] : учеб. для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1. Вивчення процесу кристалізації	3
Лабораторна робота № 2. Дослідження будови матеріалів за допомогою макроструктурного аналізу.....	5
Лабораторна робота № 3. Дослідження будови матеріалів за допомогою мікроструктурного аналізу.....	10
Лабораторна робота № 4. Дослідження фазових діаграм стану двокомпонентних систем	16
Лабораторна робота № 5. Випробування матеріалів на розтяг.....	27
Лабораторна робота № 6. Визначення твердості матеріалів	36
Лабораторна робота № 7. Визначення класу нагрівостійкості діелектриків	42
Лабораторна робота № 8. Вивчення впливу температури на опір провідників і напівпровідників	45
Лабораторна робота № 9. Визначення точки Кюрі сегнетоелектриків	51
Лабораторна робота № 10. Дослідження впливу матеріалу осердя котушки індуктивності на характеристики коливального контуру.....	56
Лабораторна робота № 11. Визначення діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат твердих діелектриків.....	61
Лабораторна робота № 12. Визначення мікротвердості матеріалів...	68
Лабораторна робота № 13. Дослідження властивостей магнітних матеріалів.....	74
Бібліографічний список.....	81

Навчальне видання

**Попова Олена Георгіївна
Пургіна Світлана Михайлівна
Попов Дмитро Олегович**

**АВІАЦІЙНЕ
ЕЛЕКТРОРАДІОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

Редактор Є. О. Александрова

Зв. план, 2016

Підписано до друку 24.03.2016

Формат 60x18 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 4,7. Обл.-вид. арк. 5,25. Наклад 100 пр.

Замовлення 128. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001