

Хмельницький національний університет

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Методичні вказівки до самостійної роботи студентів
спеціальностей 131 «Прикладна механіка»;
132 «Матеріалознавство»; 133 «Галузеве машинобудування»;
274 «Автомобільний транспорт» та 208 «Агроінженерія»*

*Затверджено на засіданні кафедри
зносостійкості і надійності машин.
Протокол № 1 від 28.08.2020*

Хмельницький 2020

Матеріалознавство : методичні вказівки до самостійної роботи студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка»; 132 «Матеріалознавство»; 133 «Галузеве машинобудування»; 274 «Автомобільний транспорт» та 208 «Агроінженерія» / О. С. Дробот, П. В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2020. – 108 с.

Укладачі: Дробот О. С., канд. техн. наук, доц.;
Каплун П. В., д-р техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук, проф.

Редактор-коректор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування та друк здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. до друку 15.09.2020. Зам. № 140/20, тир. 50 прим., 2020.

© ХНУ, 2020

Вступ

Сучасний розвиток науки та виробництва вимагає від студентів засвоєння фундаментальних наукових знань, розвитку мислення, що дозволить їм творчо вирішувати практичні задачі в процесі інженерної діяльності.

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів розроблені відповідно до програми дисципліни «Матеріалознавство», яка викладається для спеціальностей 131 «Прикладна механіка»; 132 «Матеріалознавство»; 133 «Галузеве машинобудування»; 274 «Автомобільний транспорт» та 208 «Агроінженерія». У виданні у достатньому обсязі викладено теоретичний матеріал до кожної теми, подано перелік контрольних питань, тестових завдань та завдань для самостійної роботи з прикладами їх виконання, які допоможуть студентам зрозуміти матеріал та поглибити знання з курсу.

Необхідною умовою успішної самостійної роботи над дисципліною є засвоєння студентом лекційного матеріалу кожної теми, а вже потім – виконання завдань самостійної роботи. За бажанням, він може виконувати декілька завдань і пройти самотестування.

Всі теми логічно пов'язані між собою, тому їх потрібно вивчати послідовно, відповідно до програми. Неможливо ознайомитись з окремими питаннями без їх зв'язку з попереднім матеріалом. Наприклад, неможливо зрозуміти термічну обробку, не вивчивши діаграму стану «залізо–цементит». Отже, вивчення основ матеріалознавства необхідно розпочати з ознайомлення будови та властивостей металів. Необхідно врахувати, що метали є кристалічними тілами, характер розміщення атомів в просторі описується кристалічною решіткою, основними типами решіток є об'ємно-центрована кубічна, гранецентрована кубічна та гексагональна щільно упакована. Окремі метали можуть змінювати свою кристалічну будову при зміні температури – це явище на-

зивають *поліморфізмом*. Важливим є також поняття про анізотропію кристалів. Потрібно знати, що властивості металів поділяють на фізичні, хімічні, механічні, технологічні. Методика їх визначення розглядається при вивченні технології металів.

Враховуючи, що в машинобудуванні переважно використовуються сплави, необхідно зрозуміти та вивчити основні положення теорії сплавів, особливо звернути увагу на взаємодію їх компонентів, пам'ятаючи, що при сплавленні компоненти утворюють різні фази: тверді розчини, хімічні сполуки, механічну суміш компонентів. Потрібно знати умови утворення цих фаз; розрізнити фази та структурні складові сплаву, основні типи діаграм стану подвійних сплавів, навчитись їх аналізувати. Після цього розпочинається вивчення діаграми стану «залізо–цементит», фаз і структурних складових залізовуглецевих сплавів – сталей та чавунів, класифікації сталей за структурою, маркування сталей. Необхідно з'ясувати різницю між білими та сірими чавунами, чому практичне застосування мають переважно сірі чавуни, вивчити їх маркування та класифікацію (за формою графітних включень і структурою металевої основи). Вивчити основи легування, склад, властивості, маркування легованих сталей.

При вивченні питань термічної та хіміко-термічної обробки потрібно знати суть перетворень, що відбуваються при цьому, та призначення кожного виду термічної обробки. На основі вивченого матеріалу необхідно орієнтуватись у великій кількості матеріалів, які використовуються у машинобудуванні та металообробці, знати їх властивості та рекомендувати їх для практичного використання.

Для більш глибокого вивчення теоретичного матеріалу рекомендовано користуватись підручниками та посібниками. Якщо під час самостійної роботи деякі питання виявляться студенту недостатньо зрозумілими, він може отримати консультацію у викладача.

Вивчення дисципліни та самостійне виконання студентом індивідуальних завдань дозволить набути таких компетентностей:

- засвоїти фізичну суть явищ, які відбуваються в металах під впливом різних факторів (температури, хімічної, механічної дії);
- встановити залежність властивостей від складу та будови матеріалів;
- вивчити основи теорії та технології термічної та хіміко-термічної обробки;
- вивчити основні групи металевих та неметалевих матеріалів, їх властивості та галузі застосування.

Тема 1.

Атомно-кристалічна будова металів

1.1. Теоретичні положення

Уявлення про те, що будь-яка речовина складається з дрібних частинок – атомів, було висловлене більш як 2500 років ще стародавніми філософами Левкіппом та Демокрітом. Вони допускали, що всі тіла утворюються внаслідок з'єднання атомів. Різниця властивостей пояснюється тим, що тіла складаються з *різних* атомів або з однакових атомів, що *по-різному* з'єднані між собою в просторі.

Структура матеріалів визначається багатьма факторами, які зумовлюють рівновагу процесів та явищ в матеріалах: це будова атомів, іонів молекул, розміщення електронів в них, тип зв'язку між атомами, хімічний склад речовин, вид обробки, якій їх піддавали.

Тверді тіла поділяються на дві групи, що відрізняються за властивостями. В одну групу входять тіла кристалічні, в другу – аморфні.

Кристали – тверді тіла, в яких атоми або молекули розміщені впорядковано і утворюють внутрішню структуру, яка періодично повторюється. Кристалічні тіла залишаються твердими, зберігаючи свою форму, до певної температури, яку називають *температурою плавлення*. При цій температурі вони переходять у рідкий стан.

Аморфні тіла при нагріванні розм'якшуються в широкому інтервалі температур: спочатку стають в'язкими, а потім переходять у рідкий стан.

Характерною зовнішньою ознакою будь-якого кристалу є його правильна геометрична форма. В ідеальному кристалі атоми розміщені періодично в трьох вимірах. Кожний атом має сусідів, положення яких по відношенню до нього однакове, тобто в будь-якій точці кристала атом, що розглядається, має однакову кількість сусідів, які знаходяться від нього на однаковій відстані. Таке розміщення атомів називають *дальнім порядком*.

Для опису атомно-кристалічної будови (структури) користуються поняттям кристалічної решітки – уявної просторової сітки, у вузлах якої розміщені атоми (іони). Найменша геометрично правильна частина об'єму кристалічної решітки, яка дає уяву про розміщення атомів в кристалі, називається *елементарною ґраткою*. Кристалічні решітки різних речовин відрізняються формою та розмірами елементарних ґраток.

Найбільш поширеними типами елементарних ґраток металів є: об'ємноцентрована кубічна (рис. 1.1, а), гранецентрована кубічна та гексагональна (рис. 1.1, б, в).

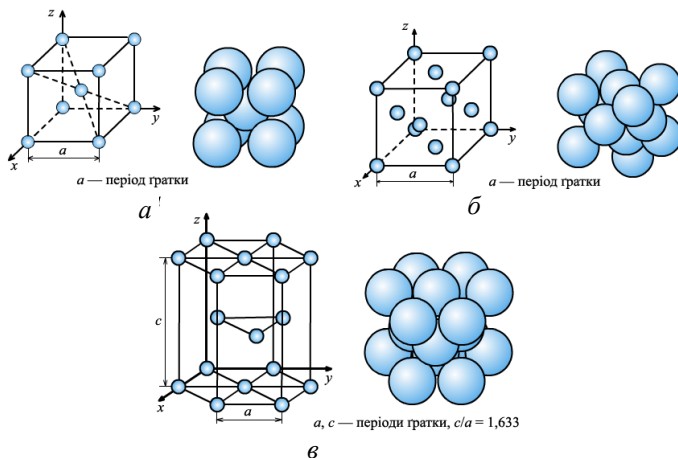


Рис. 1.1 – Основні типи елементарних ґраток:
 a – об’ємноцентрований куб (ОЦК); b – ґранецентрований куб (ГЦК);
 v – гексагональна щільно упакована (ГЦУ)

Структуру з об’ємноцентрованою кубічною решіткою, де атоми розміщені у вершинах кубу і один в його центрі, мають залізо (за температури менше 911 °С), вольфрам, хром.

Ґранецентровану кубічну решітку, де атоми розміщені у вершинах куба і в центрі кожної його грані, мають алюміній, мідь, свинець, нікель, залізо (за температури більше 911 °С).

Такі метали як цинк, кадмій, магній, титан, берилій та інші мають гексагональну кристалічну решітку.

Кристалічні решітки характеризуються такими основними параметрами: **періодом решітки**, **координаційним числом**, **базисом**, **коефіцієнтом компактності решітки**.

Період решітки – відстань між центрами двох сусідніх атомів у елементарній ґратці. Відстань між сусідніми атомами мала, вимірюється в нанометрах. Для металів вона дорівнює 0,1–0,7 нм (1 нм = 10^{-9} см).

Координаційне число K – показує кількість атомів, які знаходяться на найменшій і однаковій відстані від будь-якого вибраного атома в решітці. Координаційне число для решітки ОЦК – 8, ГЦК – 12, ГЦУ – 12.

Базис – кількість атомів, що належать одній елементарній ґратці решітки.

Базис для решітки ОЦК – 2, ГЦК – 4, ГЦУ – 6.

Коефіцієнт компактності решітки h – визначається як відношення об’єму, який займають атоми до об’єму решітки.

Коефіцієнт компактності h решітки ОЦК – 68 %, ГЦК – 74 %, ГЦУ – 74 %.

Відстань між атомами у кристалічній решітці в різних напрямках, а також щільність розміщення атомів в різних площинах не однакова. Тому і властивості кристалів в різних напрямках не однакові. Різниця властивостей кристалічних речовин в різних напрямках називається **анізотропією**. В монокристалах анізотропія досить значна. Наприклад, міцність монокристалу міді в різних напрямках змінюється від 118 до 340 МПа.

Метали є полікристалічними тілами, тому внаслідок різної орієнтації кристалів вони мають незначну анізотропію.

Деякі метали (залізо, титан, олово, марганець та ін.) при зміні температури можуть змінювати тип кристалічної решітки і її параметри. Це явище називають **алотропією** або **поліморфізмом**. Щоб розрізнити алотропічну форму (модифікацію) до хімічного символу елемента додають літеру грецького алфавіту: наприклад, Fe_α, Fe_γ, Fe_δ. Літерою α позначають низькотемпературну модифікацію; β – модифікацію за вищої температури; γ, δ – модифікацію за ще вищою. Алотропічні перетворення відбуваються при постійній температурі, тому на кривій охолодження або нагрівання має місце горизонтальна сходинка.

Класифікація металів. Метали, за їх характерними властивостями, поділяють на такі основні групи (табл. А.1, додаток А):

– чорні та кольорові. Залізо та сплави на його основі (сталь, чавун) **називають** чорними, решту металів та їх сплави називають **кольоровими**;

– легкі метали – Be, Mg, Al, Ti та їх сплави, які мають густину менше 5 г/см³;

– легкоплавкі – Zn, Cd, Hg, Sn, Pb, Bi, які мають невисоку температуру плавлення і сплави на їх основі з температурою плавлення меншою за 1000 °С;

– тугоплавкі метали з температурою плавлення вищою ніж у заліза – W, Mo, Nb, Ti;

– благородні метали – Ag, Au, Pt, Pd, Ru, Os, In і сплави на їх основі;

– лужні та лужно-земельні метали – Li, Na, Ca, Mg та ін.

1.2. Будова реальних металів. Дефекти кристалів

Реальні кристали відрізняються будовою від ідеальних. Вони завжди мають дефекти. Дефекти поділяють на точкові, лінійні, поверхневі.

Точкові дефекти. До них відносять вакансії, міжвузлові атоми основної речовини, атоми домішок.

Вакансія – пустий вузол кристалічної решітки; міжвузловий атом – атом, який виведений з стану рівноваги і знаходиться у міжвузловому просторі; атоми домішок – це атоми інших речовин. Вакансії утворюються внаслідок виходу атома з свого регулярного положення і звільнення цим атомом вузла в кристалічній решітці. Міжвузловий атом утворюється при переміщенні атома в міжвузловий простір. Якщо в кристалічну решітку попадає атом іншого елемента, то утворюється точковий дефект, який називають **домішковим атомом** (рис. 1.2).

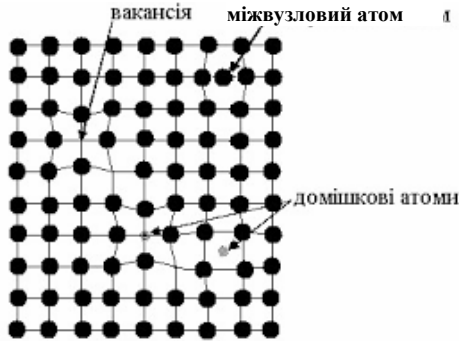


Рис. 1.2 – Точкові дефекти в кристалічній решітці

Завдяки тепловому переміщенню атомів точкові дефекти можуть змінювати своє положення, тобто рухатися в кристалічній решітці. Вакансії відіграють значну роль в процесах, які відбуваються при підвищених температурах і пов'язані з переміщенням атомів: дифузія при спіканні порошків, термічній та хіміко-термічній обробці, зварюванні.

Лінійні дефекти. Найпоширенішим видом лінійних дефектів є дислокації – недобудовані атомні площини, які укорінені в кристалічну решітку. Навколо дислокації решітка пружно викривлена. Дислокації утворюються під час кристалізації металів, а також при пластичній деформації та перетвореннях, що відбуваються при нагріванні та охолодженні металу (рис. 1.3).

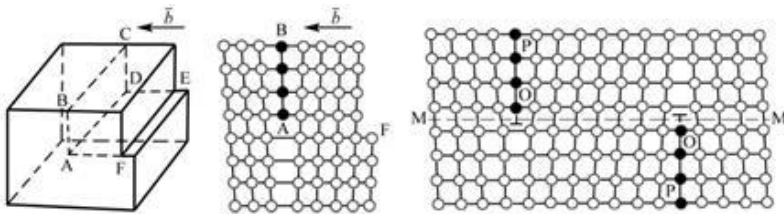


Рис. 1.3 – Лінійні дефекти в кристалічній решітці (AB – дислокація)

Кількість дислокацій в металі оцінюють такою величиною, як густина дислокацій. **Густина дислокацій** – сумарна довжина дислокацій $\sum \ell$, що знаходяться в одиниці об'єму кристала. Таким чином, густина дислокацій дорівнює:

$$\rho = \frac{\sum \ell, \text{м}}{V, \text{м}^3} = \frac{\sum \ell}{V}, \text{м}^{-2}.$$

Дислокацій в металах дуже багато. Для недеформованих металів $\rho = 10^6$ – 10^8 см^{-2} , для деформованих металів або металів, що піддавались іншим видам зміцнювальної обробки, вона зростає до $\rho = 10^{10}$ – 10^{12} см^{-2} . Дислокації активно впливають на механічні характеристики металів, на їх фізичні та хімічні властивості.

Поверхневі дефекти – границі кристалів (зерен), блоків, з яких утворені грані кристалів.

1.3. Основні властивості металів та сплавів

Метали і сплави мають певні властивості, які поділяють на **фізичні** (питома вага, температура плавлення, теплоємність, електропровідність, коефіцієнт лінійного розширення, магнітні властивості); **механічні** (міцність, твердість, ударна в'язкість, опір втомі), які визначають працездатність металів; **технологічні** (ковкість, рідкотекучість, зварюваність, оброблюваність різанням), які визначають здатність металів і сплавів піддаватись різним видам гарячої та холодної обробки; **хімічні** (корозійна стійкість, жаростійкість, жароміцність), які визначають стійкість металів в агресивних середовищах при нормальній та підвищеній температурі. Всі ці властивості залежать від природи металу та його внутрішньої будови.

Контрольні питання

1. Фізичні, хімічні та механічні властивості металів і сплавів.
2. Які типи ґраток мають метали?
3. Параметри кристалічної ґратки.
4. Чим відрізняється реальна ґратка від ідеальної?
5. Охарактеризуйте дефекти реальних металів.
6. Як впливає густина дислокацій на міцність металів?
7. Які метали належать до групи легкоплавких?
8. Які метали є тугоплавкими?
9. Які метали належать до групи легких?
10. Які метали є поліморфними?

Тестові завдання

Виберіть правильну відповідь

1. Які властивості належать до фізичних?

- а) міцність, твердість; г) зносостійкість, утома;
б) густина, теплопровідність; д) штампування, рідкотекучість.
в) пластичність, зварюваність;

2. Які властивості належать до механічних?

- а) температура плавлення, теплоємність; г) твердість, міцність;
б) штампування, електропровідність; д) теплоємність, густина.
в) витривалість, теплопровідність;

3. Які властивості належать до технологічних?

- а) штампування, пластичність; г) теплоємність, теплопровідність;
б) твердість, зварюваність; д) міцність, твердість.
в) здатність до окиснення;

4. За якою формулою знаходять міцність металів?

- а) $\rho = \frac{\sum l}{V}, \hat{m} / \hat{m}^3$; в) $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$; д) $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$.
б) $\sigma_\beta = \frac{P_{\max}}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$; г) $\sigma_{i\delta} = \frac{P_{i\delta}}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$;

5. За якою формулою знаходять пластичність металів?

- а) $\sigma_\beta = \frac{P_{\max}}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$; в) $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$; д) $\rho = \frac{\sum l}{V}, \hat{m} / \hat{m}^3$.
б) $\sigma_{i\delta} = \frac{P_{i\delta}}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$; г) $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$;

6. За якою формулою знаходять відносне видовження?

- а) $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$; в) $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$; д) $\rho = \frac{\sum l}{V}, \hat{m} / \hat{m}^3$.
б) $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$; г) $\sigma_\beta = \frac{P_{\max}}{F_0}, \hat{N} / \hat{m}^2$;

7. Яка властивість матеріалу входить до складу характеристик, що визначають металевий стан речовини?

- а) твердість; б) пластичність; в) густина; г) в'язкість; д) міцність.

8. Який характер розміщення атомів у кристалічних тілах?

- а) дальній; в) дальній та ближній; д) неупорядкований.
б) ближній; г) хаотичний;

9. Як називають мінімальну відстань між центрами атомів елементарної ґратки?

- а) критичним радіусом; г) періодом;
б) критичним діаметром; д) координаційним числом.
в) параметром;

10. Як називають властивість металів мати різну кристалічну будову при різних температурах?

- а) активацією; в) поліморфізмом; д) ізоморфізм.
б) анізотропією; г) кристалізацією;

11. Як називається мінімальний комплекс атомів, який здатний при багаторазовому повторенні в просторі відтворювати кристалічну решітку металу?

- а) елементарною ґраткою; в) зерном; д) субзерном.
б) кристалічною решіткою; г) блоками;

12. Відстань між атомами у кристалічній решітці вимірюють у:

- а) мм; б) Å ; в) нм; г) см; д) мкм.

13. Якими методами на сьогодні вивчають розміщення атомів у кристалах?

- а) мікроструктурним аналізом; г) магнітними методами;
б) рентгеноструктурним аналізом; д) макроструктурним аналізом.
в) розрахунковим методом;

14. Якими є властивості кристала в різних площинах та різних кристалографічних напрямках?

- а) ізотропними; г) однаковими;
б) квазіізотропними; д) відрізняються на порядок
в) анізотропними; залежно від напрямку.

15. Що визначає координаційне число решітки?

- а) кількість атомів, які розміщені у вузлах кристалічної решітки;
б) число атомів, які розміщені на найменшій відстані від атома, що розглядаються;
в) максимальна кількість атомів, які розміщені на однаковій мінімальній відстані від будь-якого атома кристалічної решітки;
г) число атомів, що належать одній елементарній ґратці;
д) середній розмір атома.

16. Чому дорівнює координаційне число решітки ГЦУ?

- а) 15; б) 6; в) 12; г) 8; д) 9.

17. Чому дорівнює координаційне число решітки ОЦК?

- а) 6; б) 12; в) 8; г) 9; д) 14.

18. Що належить до точкових дефектів кристалічної будови металів?

- а) вакансії; в) дендрити; д) границі блоків.
б) дислокації; г) усадочна раковина;

19. Що належить до лінійних дефектів кристалічної будови металів?

- а) ліквація; в) дислокація; д) домішкові атоми.
б) міжвузловий атом; г) усадочна раковина;

20. Скільки атомів містить елементарна ґратка об'ємно-центрованої кубічної решітки?

- а) 8; б) 12; в) 9; г) 14; д) 15.

21. Скільки атомів містить елементарна ґратка гранецентрованої кубічної решітки?

- а) 6; б) 14; в) 8; г) 14; д) 12.

22. Як змінюється об'єм металу при плавленні?

- а) збільшується; б) зменшується; в) не змінюється.

23. Що таке «вакансія»?

- а) лінійний дефект кристалічної решітки; г) границя зерна;
б) недобудована грань куба; д) поверхневий дефект
в) точковий дефект кристалічної решітки; кристалу.

24. Точкові дефекти – це:

- а) границі зерен, мікротріщини; г) пори та тріщини;
б) міжвузлові атоми, вакансія; д) дислокації.
в) неметалеві включення;

25. Лінійні дефекти – це:

- а) границі зерен; в) макротріщини; д) мікротріщини.
б) ланцюги вакансій; г) дислокації;

26. Яку решітку має Fe_α?

- а) об'ємноцентрований куб; г) тетрагональну;
б) гексагональну щільно упаковану; д) гранецентрований куб.
в) кубічну просту;

27. Яку решітку має Fe?

- а) об'ємноцентрований куб;
- б) гексагональну щільно упаковану;
- в) просту кубічну;
- г) гранецентрований куб;
- д) тетрагональну.

28. Поліморфізм – це здатність:

- а) зерен подрібнюватись під час механічної обробки;
- б) металів змінювати кристалічну решітку під час зміни температури;
- в) металів до пластичної деформації;
- г) металів плавитись;
- д) металів зберігати кристалічну будову при нагріванні.

29. Що таке анізотропія властивостей кристалів?

- а) здатність металів змінювати свої властивості під дією прикладеної сили;
- б) неоднаковість властивостей кристалів в різних напрямках;
- в) здатність металів мати неоднакові властивості при різних температурах;
- г) здатність металів не змінювати свої властивості при нагріванні;
- д) здатність металів змінювати свої властивості при пластичній деформації.

30. Як впливають дислокації на міцність металів?

- а) збільшують міцність;
- б) зменшують міцність;
- в) не впливають;
- г) дислокації до певної кількості зменшують міцність, а потім збільшують;
- д) при нагріванні дислокації збільшують міцність металів.

31. Як називають властивість, що характеризує здатність металу змінювати свою форму та розміри під дією зовнішньої сили без руйнування?

- а) пружність;
- б) в'язкість;
- в) міцність;
- г) пластичність;
- д) твердість.

32. Яка властивість належить до експлуатаційних властивостей металів?

- а) зносостійкість;
- б) міцність;
- в) твердість;
- г) пружність;
- д) рідкотекучість.

33. Що є характеристикою здатності металу працювати при динамічних навантаженнях?

- а) міцність;
- б) твердість;
- в) ударна в'язкість;
- г) пластичність;
- д) витривалість.

34. Як називається властивість металів чинити опір руйнуванню при статичних навантаженнях?

- а) міцність; в) ударна в'язкість; д) надійність.
б) твердість; г) відносне видовження;

35. Які метали належать до групи тугоплавких?

- а) Al, In, Mg, Fe; в) Cd, Au, Sn, Pb; д) Li, Be, Bi, Os.
б) Ti, Cr, W, Mo; г) Pt, Zn, Ag, Cu;

36. Які метали належать до групи легкоплавких?

- а) Pt, W, Ni, Co; б) Fe, Cu, Mo, V; д) Te, Nb, Si, Zr.
в) Li, Al, Mg, Sn; г) Re, Ti, Cr, Ta;

37. Які метали належать до групи легких?

- а) Li, Al, Mg, Ti, Os; б) Re, Ti, Cr, Ta; д) Sn, Ni, Co, Fe.
в) Pt, Zn, Ag, Cu; г) Cr, W, Mo, Nb;

38. Які метали належать до групи лужно-земельних?

- а) Sb, Ce, Bi, Th; б) Cd, Au, Sn, Pb; д) Ti, Cr, W, Mo.
в) Ta, Nb, Si, Zr; г) Li, Na, K, Mg;

39. Які з наведених металів належать до групи благородних?

- а) Li, Be, Bi, Al; б) Fe, Cu, Mo, V; д) Re, Ti, Cr, Ta.
в) Cr, W, Mo, Nb; г) Pt, Pd, Au, Os;

40. Чим кристалічні тіла відрізняються від аморфних?

- а) величиною атомів та молекул;
б) температурою плавлення;
в) впорядкованим розміщенням атомів;
г) хаотичним розміщенням атомів;
д) наявністю ближнього і дальнього порядку в розміщенні атомів.

Тема 2. Пластична деформація і рекристалізація металів

2.1. Теоретичні положення

Пластичною деформацією називають *зміну розмірів та форми тіла під дією прикладених сил, та збереження цих змін після припинення дії сил*. Під час пластичної деформації відбуваються процеси ковзання чи двійникування. В монокристалі при *ковзанні* спочатку виникають пружні викривлення кристалічної решітки, а при збільшенні напруження – зсув однієї частини кристала відносно іншої.

Площинами ковзання є площини з найбільш щільною упаковкою атомів. В процесі ковзання переміщується не вся частина кристала одночасно, а відбувається переміщення дислокацій вздовж площини ковзання на відстані менші ніж відстань між атомами.

Двійникування – теж зсув площин в певному напрямі, однак він відбувається таким чином, що одна частина кристала переходить в положення, симетричне відносно до його іншої частини та щодо певної площини двійникування.

Схеми ковзання та двійникування монокристала наведені на рис. 2.1.

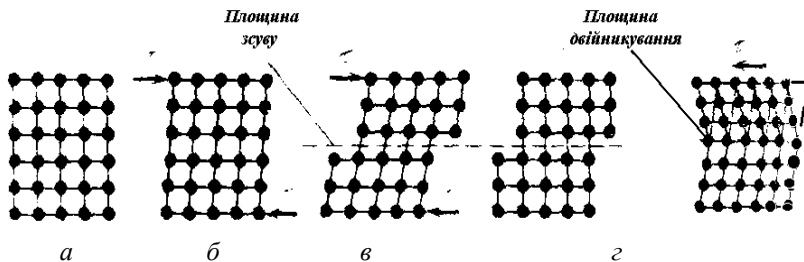


Рис. 2.1 – Схема пластичної деформації монокристала ковзанням та двійникуванням: а – недеформований кристал; б – поява пластичної деформації; в – залишкова деформація (зсув на один період решітки); г – утворення двійника

Пластична деформація полікристалічного металу відбувається внаслідок деформації кожного зерна. Починається деформація в зернах, орієнтація яких збігається з напрямом прикладених напружень. На цій стадії деформації під мікроскопом спостерігають сліди ковзання у вигляді прямих ліній, які однаково орієнтовані в межах окремих зерен.

При збільшенні деформації зерна змінюють свою форму. До деформації зерно мало округлу форму, а після деформації – витягнуту в напрямі дії прикладених сил. Утворюється волокниста структура (рис. 2.2).

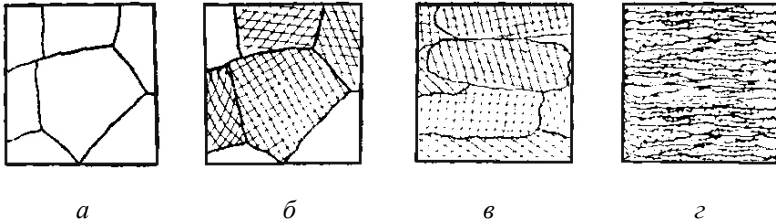


Рис. 2.2 – Вплив пластичної деформації на макроструктуру металу:
a – недеформований метал;
б – початкова стадія деформації; *в, з* – деформований метал

При великих ступенях деформації зерна мають закономірну орієнтацію кристалографічних площин. Таку будову металу називають **текстурою**. Текстурований метал має анізотропію механічних та фізичних властивостей.

Пластична деформація змінює не тільки структуру металу, але і його властивості: підвищується твердість, міцність, межа текучості, а пластичність зменшується. Ці зміни тим більші, чим вища ступінь деформації. Явище зміни структури, механічних та фізико-хімічних властивостей металу при холодній пластичній деформації називають **нагартуванням**. Наклепаний метал має підвищену кількість дефектів, яка порівняно з недеформованим станом збільшується на два–чотири порядки і може сягати $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для багатьох технологічних процесів (холодна прокатка, волочіння, штампування) нагартування є небажаним явищем. В машинобудуванні нагартування використовують для поверхневого зміцнення деталей. Наприклад, опорні шийки валів піддають інтенсивній холодній обробці тиском твердими роликками з метою зменшення зносу та підвищення строку служби. Ресори, пружини піддають обробці дробом чи гідроабразивній обробці для створення в поверхневому шарі залишкових напружень стиску, що підвищує межу витривалості в 1,5–2 рази.

Усунути нагартування, відновити пластичність можна нагріванням холоднодеформованого металу. При нагріванні в металі відбуваються процеси повороту, полігонізації та рекристалізації, які забезпечують відновлення властивостей.

Поворот для технічно чистих металів відбувається при нагріванні до $0,2T_{пл}$. Зменшується кількість точкових дефектів. Структура та властивості металу практично не змінюються.

Полігонізація починається при температурах $0,3T_{пл}$, суть процесу полягає в фрагментації кристалітів на субзерен. Утворюються дислокаційні стінки, кількість дислокацій зменшується (рис. 2.3). Міцність та твердість металу зменшуються, частково усуваються внутрішні напруження. Структура металу залишається волокнистою.

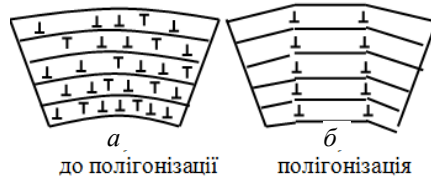


Рис. 2.3 – Характер розподілу дислокацій у зерні після: а – деформації; б – рекристалізації

При підвищенні температури до $(0,4-0,5)T_{пл}$ в деформованому металі з'являються зародки нових зерен з не викривленою решіткою і при витримці вони ростуть. Замість волокнистої структури деформованого металу утворюються нові рівноосьові зерна. Цей процес називають **рекристалізацією**. Деформовані зерна замінюються новими рівноосьовими (рис. 2.4 та 2.5).

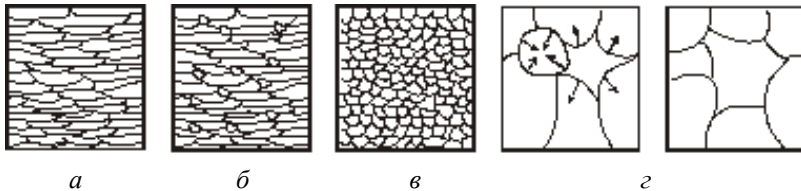


Рис. 2.4 – Зміна мікроструктури деформованого металу при нагріванні: а – нагартований метал; б – початок рекристалізації; в – завершення первинної рекристалізації; г – вторинна рекристалізація

Внутрішні напруження зникають, твердість та міцність зменшуються, пластичність збільшується. Внаслідок рекристалізації нагартування практично повністю усувається. Густина дислокацій зменшується з $10^{10}-10^{12}$ до 10^6-10^8 см⁻².

Температура початку рекристалізації за правилом Бочвара А.А. визначається за формулою:

$$t_{рекр.} = a \cdot T_{пл}$$

Коефіцієнт a для технічно чистих металів дорівнює 0,4–0,5, для хімічно чистих – 0,1–0,2, а для спеціальних сплавів із структурою твердого розчину – 0,6–0,8.

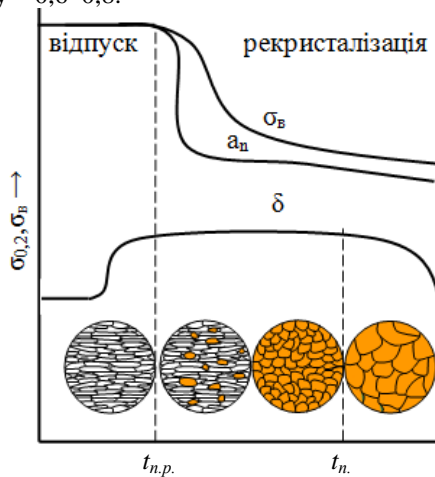


Рис. 2.5 – Зміна структури і властивостей наклепаного металу при відпуску та рекристалізації:
 $t_{n.p.}$ – температурний поріг рекристалізації;
 t_n – початок збіральної рекристалізації

Розмір рекристалізованого зерна залежить від ступеня попередньої холодної деформації, температури нагрівання та тривалості витримки.

Розрізняють холодну та гарячу пластичну деформацію.

Холодною деформацією називають таку, що відбувається при температурах, нижчих за температуру рекристалізації. Тому холодна деформація супроводжується нагартуванням.

Гарячу деформацію проводять при температурах вищих за температуру рекристалізації. Така деформація не викликає нагартування.

Контрольні питання

1. Механізм пластичної деформації.
2. Як відбувається пластична деформація монокристала?
3. Як відбувається пластична деформація полікристалічного металу?
4. Що таке нагартування, чому воно виникає?
5. Текстура деформації. Як вона впливає на властивості металу?
6. Що таке поворот?
7. Що таке полігонізація?
8. Що таке рекристалізація?

9. Як змінюються властивості холоднодеформованого металу після рекристалізації?

10. Які фактори впливають на розмір рекристалізованого зерна?

Тестові завдання

Виберіть правильну відповідь

1. Що називають дислокацією?

- а) лінійний дефект;
- б) точковий дефект;
- в) спільна площина двох кристалів;
- г) грань куба;
- д) діагональна площина.

2. Як змінюється кількість дислокацій при великих ступенях деформації?

- а) збільшується в сотні разів;
- б) зменшується на два–три порядки;
- в) збільшується на два–три порядки;
- г) зростає у декілька разів;
- д) не змінюється.

3. Які дислокації викликають пластичну деформацію в металі?

- а) що утворилися у процесі кристалізації;
- б) що генеруються джерелами дислокацій у процесі деформації;
- в) переважно крайові;
- г) гвинтові;
- д) змішані.

4. Чим супроводжується розвиток тріщини в процесі її росту?

- а) переміщенням дислокацій;
- б) рухом дислокації перед фронтом тріщини;
- в) збільшенням твердості;
- г) утворенням «сидячих» дислокацій;
- д) рухом дислокацій за фронтом тріщини.

5. Які фактори впливають на коефіцієнт α у формулі: $T_p \cong \alpha T_{кл}$?

- а) чистота металу;
- б) ступінь деформації;
- в) температура нагрівання;
- г) час витримки при заданій температурі;
- д) швидкість нагрівання.

6. Що таке наклеп (нагартування)?

- а) збільшення таких характеристик металу як міцність, твердість у процесі пластичної деформації;
- б) утворення волокнистої структури металу;
- в) зменшення пластичності металу під час пластичної деформації;
- г) утворення дрібнозернистої структури під час холодної пластичної деформації;
- д) явище появи тріщин під час пластичної деформації.

7. Які явища в металі сприяють наклепу?

- а) подрібнення блоків та зерен;

- б) рух і ріст кількості дислокацій;
- в) зміцнення металу та зменшення його пластичності;
- г) утворення текстури.

8. Чи можливий наклеп металу, якщо деформація здійснювалася при температурах, які вищі за температуру рекристалізації?

- а) можливий; в) можливий, якщо швидкість
- б) неможливий; деформації вища за швидкість рекристалізації.

9. Що таке текстура деформації?

- а) коли всі зерна металу витягнуті;
- б) коли зерна однакових розмірів;
- в) коли зерна витягнуті і кристалографічні напрями в них однакові;
- г) структура, яка утворюється після рекристалізації;
- д) коли виникає анізотропія властивостей.

10. З якою метою проводять рекристалізаційний відпал?

- а) з метою подрібнення зерна;
- б) з метою одержання однакових за розміром зерен;
- в) з метою усунення наклепу після пластичної деформації;
- г) для нагрівання заготовок між операціями холодної пластичної деформації;
- д) для подрібнення структури виливків після кристалізації.

11. Чому дорівнює температура рекристалізації технічно чистих металів?

- а) $t_p > 0,6T_{пл}$; б) $T_p > 0,4T_{пл}$; в) $t_p > 0,2T_{пл}$; г) $T_p \approx 0,4T_{пл}$; д) $T_p \approx aT_{пл}$.

12. Які процеси відбуваються при нагріванні нагартованого металу, коли температура нагрівання вища за температуру рекристалізації?

- а) поворот; г) полігонізація;
- б) рекристалізація; д) кристалізація.
- в) вторинна рекристалізація;

13. Що таке полігонізація, як вона впливає на кількість дислокацій?

- а) відбувається процес утворення субзерен;
- б) утворюються нові зерна з невикривленою решіткою;
- в) дислокації одного знаку відштовхуються; різного знаку – анігілюють, кількість їх зменшується;
- г) зменшення рівня залишкових напружень.

14. Яка різниця між поліморфізмом та рекристалізацією?

- а) у температурі протікання цих процесів;
- б) в механізмі утворення нової кристалічної структури;
- в) у типах решіток, що утворюються під час цих процесів.

15. Які процеси відбуваються під час повороту?

- а) утворення нових зерен;
- б) усунення внутрішніх напружень;
- в) відновлення властивостей металу;
- г) подрібнення структури;
- д) зменшення твердості.

16. Які фактори впливають на розмір зерна рекристалізованого металу?

- а) температура процесу кристалізації;
- б) ступінь попередньої деформації;
- в) тривалість рекристалізаційного відпалу;
- г) тип кристалічної решітки;
- д) хімічний склад сплаву.

18. Як впливає полігонізація на густину дислокацій в металі?

- а) крайові дислокації однакового знаку групуються у «стінки»;
- б) утворюються дислокаційні «стінки»;
- в) утворюються субзерна;
- г) зменшується кількість дефектів;
- д) зменшується розмір зерна.

19. З якою метою деталі піддають обробці дробом?

- а) підвищення чистоти поверхні заготовок;
- б) виправлення дефектів виливків;
- в) підвищення довговічності ресор і пружин;
- г) підвищення твердості та міцності поверхневого шару заготовок;
- д) зміни шорсткості поверхні.

20. Що є причиною формування у пластично деформованих металів волокнистої структури?

- а) дія тангенційних напружень;
- б) наявність домішок;
- в) напрям прикладених сил;
- г) подрібнення та витягання структурних складових;
- д) анізотропія кристалів.

Варіанти завдань самостійної роботи

1. Поясніть та опишіть зміни структури та властивостей металу під час холодної пластичної деформації.

2. Для одержання міцного сталевого дроту проводили волокніння прутків за декілька переходів зі значним обтисканням. На останніх переходах в прутках з'явилися тріщини. Поясніть причину появи браку, запропонуйте технологію одержання міцного та якісного дроту.

3. Для виготовлення деталей типу стаканів методом витягання запропоновано мідний та цинковий сплави. Виберіть технологічний сплав.

4. Волочіння дроту проводили при температурі рекристалізації, однак через декілька переходів дріт обірвався. Поясніть причину та дайте рекомендації для попередження цього явища.

5. Поясніть причину появи у полікристалічного сплаву анізотропії властивостей після холодної пластичної деформації.

6. Для усунення наклепу мідні листи піддавали рекристалізаційному відпалу при температурі 800 °С. Внаслідок цього значно зменшилась в'язкість. Поясніть причину цього дефекту, запропонуйте метод його усунення.

7. Під час гарячої обробки тиском поковки з вуглецевої сталі обробляли з ступенем пластичної деформації 8 %. Внаслідок цього різко зменшилась ударна в'язкість. Поясніть причину цього, запропонуйте заходи для усуненню цього дефекту.

8. Пластину з вуглецевої сталі після холодної пластичної деформації, ступінь якої сягала 12 %, нагрівали до температури 350 °С. Опишіть процеси, що відбуваються при цьому.

9. Поясніть чому після холодної пластичної деформації зміцнюються метали. Опишіть природу такого зміцнення та галузі застосування.

10. Запропонуйте режим обробки холоднодеформованої латуні, якщо необхідно частково зняти внутрішні напруження без значного зниження міцності.

11. Для холоднокатаних сталевих прутків потрібно провести рекристалізаційний відпал. Запропонуйте режим відпалу, опишіть його призначення та процеси, що відбуваються під час відпалу.

12. Опишіть різницю в мікроструктурі зразків заліза після деформації з великими ступенями при температурі 20° та 600 °С. Опишіть процеси, які відбуваються під час обробки.

13. Холоднодеформовані деталі з алюмінію працюють при температурі 150 °С. Чи можлива за цих умов безаварійна робота деталей? Чи відбуватимуться за цих умов рекристалізаційні процеси.

14. Поясніть, чому поверхневою пластичною деформацією можна зміцнити деталі та інструменти.

15. Що таке текстура деформації? Коли вона виникає і як впливає на механічні та технологічні властивості металів та сплавів?

16. Опишіть які фактори впливають на температуру рекристалізаційного відпалу.

17. Опишіть вплив наклепу на механічні властивості металів.

18. Опишіть суть процесів, які відбуваються під час первинної рекристалізації.

19. Гнучий в холодному стані мідний пруток піддавали рекристалізаційному відпалу для усунення наклепу. Опишіть структуру прутка після деформації та після відпалу, суть процесів, які відбулися.

20. Що таке повернення та полігонізація?

21. Опишіть структуру та властивості алюмінію після холодної та гарячої пластичної деформації.

22. Розрахуйте температуру рекристалізаційного відпалу для заготовок з алюмінію.

23. Заготовки із міді до штампування мали твердість НВ 85, після штампування – НВ 140. Поясніть причину збільшення твердості. Опишіть зміни в структурі міді.

24. Поясніть, чи можливо досягти значного зміцнення свинцю, якщо його піддавати пластичній деформації при кімнатній температурі.

25. До якого виду деформації (холодної чи гарячої) належить: прокатка олова при кімнатній температурі та кування сталі за 400 °С?

Приклад виконання самостійного завдання

Завдання. Під час пластичної деформації витягуванням, вироби із латуні втратили пластичність. Призначте режим обробки для підвищення пластичності. Опишіть процеси, які відбуваються при цьому.

Відповідь. При збільшенні ступеня пластичної деформації властивості (міцність, межа текучості, твердість) підвищуються, а здатність до пластичної деформації – пластичність (відносне видовження та звуження) – зменшуються. Це явище називають *наклепом*.

Зміцнення металу під час пластичної деформації пояснюється збільшенням кількості дефектів кристалічної будови (дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів). Збільшується також кількість блоків і поверхня малокутових границь. Збільшення щільності дефектів кристалічної будови утруднює рух окремих дислокацій, а це підвищує опір деформації і знижує пластичність.

Для підвищення пластичності наклепаних виробів необхідно провести рекристалізаційний відпал. Найменша температура початку рекристалізації визначається за формулою Бочвара, К:

$$T_{рек.} = (0,5-0,6)T_{пл.}$$

Температура плавлення латуні майже 1000 °С (за Кельвіном – 1273 К), підставимо значення у формулу, вибравши коефіцієнт $a = 0,5$.

$$T_{рек.} = 0,5 \cdot 1273 = 622 \text{ К (відповідає } 249 \text{ °С)}.$$

При нагріванні деформованого металу замість орієнтованої волокнистої структури відбувається утворення нових рівноосьових зерен. Зародки цих зерен виникають на ділянках з підвищеною густиною дефектів, а потім під час витримки ростуть внаслідок переходу до них атомів від деформованих зерен. Внаслідок рекристалізації наклеп практично повністю зникає і властивості наближаються до вихідних значень. Знеміцнення пояснюється усуненням викривлень кристалічної решітки, різким зменшенням густини дислокацій (з 10^{10} – 10^{12} до 10^6 – 10^8 см⁻²) і формуванням рівноосьового зерна.

Тема 3.

Основи теорії сплавів.

Діаграми стану двокomпонентних сплавів

3.1. Теоретичні положення

Металічний сплав – матеріал, який має металічні властивості і складається з двох або більшої кількості компонентів. Компоненти – це найчастіше інші метали або неметали (наприклад, вуглець у сталях та чавунах). Сплави одержують при кристалізації рідкого розплаву, при спіканні, дифузійній металізації, електролітичному осадженні.

Більшість металів в рідкому стані необмежено розчинені один в одному, іноді зустрічається їх обмежена розчинність або відсутня розчинність. Елементи, що входять до складу сплаву називаються **компонентами**.

Система сплавів – сукупність сплавів, які можуть бути виготовлені з цих компонентів.

Фаза – однорідна частина системи, яка має однаковий склад, будову, але відокремлена від інших частин системи поверхнею розділу, при переході через яку властивості змінюються різко (стрибком).

Структурна складова – частина сплаву, яку розпізнають при дослідженні під мікроскопом за певною ознакою (кольором, формою).

Структурна складова може складатись з однієї фази, або декількох. Розрізняють **макроструктуру**, тобто будову металів та сплавів, яку вивчають неозброєним оком, або при збільшенні у 30 разів та мікроструктуру, яку вивчають і спостерігають під мікроскопом при збільшеннях від 100 до 2000 разів.

3.2. Фази в металевих сплавах

При кристалізації із рідкого стану залежно від фізико-хімічної взаємодії компонентів можуть утворюватись такі тверді фази: чисті компоненти, тверді розчини, хімічні сполуки.

Механічні суміші компонентів утворюються у тих випадках, коли компоненти у твердому стані не взаємодіють між собою (не розчиняються один в одному і не утворюють хімічні сполуки). Схематично це можна показати так: $A + B$ – розплав – $A + B$. Внаслідок кристалізації утворюються кристали кожного з компонентів з утворенням своєї власної кристалічної решітки.

Тверді розчини. Твердим розчином називають фази, в яких атоми одного компонента певним чином розташовані в кристалічній

гратці іншого компонента. Компонент, кристалічна гратка якого зберігається як основа сплаву, називають **розчинником**. Компонент, атоми якого розташовуються в гратці основного металу, називають **розчинним елементом**. Тверді розчини мають змінний хімічний склад. Позначають їх на діаграмах грецькими літерами α , γ , δ тощо. Схематично це можна показати так: $A + B$ – розплав – α . Внаслідок кристалізації утворюються кристали однієї фази – твердого розчину, який має гратку одного з компонентів (розчинника).

Залежно від характеру розміщення атомів розчиненого компонента у гратці розчинника, розрізняють тверді розчини заміщення і проникнення. Схеми кристалічної будови таких розчинів показано на рис. 3.1.

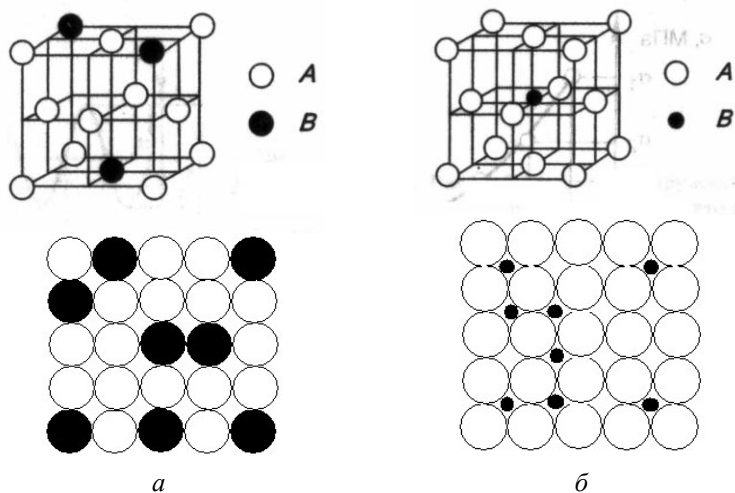


Рис. 3.1 – Елементарні кристалічні гратки і схеми будови твердих розчинів:
а – заміщення; б – проникнення,
(A – атом компонента розчинника; B – атом розчиненого компонента)

Тверді розчини заміщення. У твердих розчинах заміщення (рис. 3.1, а) атоми розчиненого елемента B заміщують частину атомів розчинника A у вузлах його кристалічної гратки.

Залежно від кількості компонента, який може розчинитись в гратці розчинника, тверді розчини поділяють на тверді розчини з необмеженою розчинністю, та з обмеженою розчинністю компонентів. При необмеженій розчинності можлива заміна концентрації розчиненого елемента до 100 %, тобто утворюється неперервний ряд твердих розчинів.

В обмежених твердих розчинах в гратці розчинника може розміститися тільки певна кількість атомів розчиненого компонента.

Тверді розчини заміщення з необмеженою розчинністю утворюються за наступних умов:

1. Кристалічні ґратки компонентів A і B мають бути ізоморфними (одного типу) і мати схожу будову електронних оболонок атомів.

2. Різниця атомних радіусів компонентів не має перевищувати 8–10 %.

3. Компоненти A і B повинні знаходитись в таблиці Д.М. Менделєєва в одній групі або підгрупі.

Тверді розчини з необмеженою розчинністю утворюються в системах: Cu–Ni, Ag–Au, Nb–Ti. Тверді розчини з обмеженою розчинністю утворюються в системах: Al–Si, Al–Cu, Al–Mg, Cu–Zn та інших. Розчинність компонентів в різних системах не однакова – вона може змінюватись від десятих до десятків відсотка.

Тверді розчини проникнення. В твердих розчинах проникнення (див. рис. 3.1, б) атоми розчиненого елемента розташовуються між вузлами кристалічної ґратки розчинника. Тверді розчини проникнення можуть бути тільки з обмеженою розчинністю. Вони утворюються при взаємодії металів з неметалами (вуглець, водень, азот, бор, кисень), які мають невеликі атомні радіуси порівняно з металами, завдяки чому їх атоми можуть розміщуватись у вузлах кристалічної ґратки. У таких розчинах відношення радіуса атома розчиненої речовини (неметалу) до радіуса атома розчинника (основного металу) має не перевищувати 0,59.

Хімічні сполуки – фази, що утворюються з компонентів, які у певному кількісному співвідношенні вступають у хімічну реакцію, внаслідок чого утворюється фаза з новою кристалічною ґраткою, яка відрізняється від ґраток вихідних компонентів. Хімічні сполуки записують у вигляді формули A_mB_n , (наприклад, Fe_3C). Такий запис означає, що на три атоми заліза в сполуці припадає один атом вуглецю. Як правило, хімічні сполуки утворюються між компонентами, які мають різні типи кристалічних ґраток і сильно відрізняються електронною будовою. Схематично це можна показати так: $A + B$ – розплав – A_mB_n . Внаслідок кристалізації утворюються кристали однієї фази – хімічної сполуки, яка має свою ґратку, не схожу на ґратку компонентів, з яких вона утворена. Хімічні сполуки, які утворюються між металами, називають **інтерметалідами** (Ni_3Al , $CuAl_6$). Хімічні сполуки металу з вуглецем, називають **карбідами** ($Cr_{23}C_6$, Fe_3C), металу з азотом – нітридами (Fe_2N , TiN), з азотом і вуглецем – карбонітридами (Fe_3CN , $TiCN$), а з бором – борідами (FeB , Fe_2B) тощо. Властивості хімічних сполук різко відрізняються від властивостей компонентів, з яких вони утворені. Сполуки мають значно вищу твердість і міцність, більший електричний опір, більшу крихкість.

Реальні сплави мають складну структуру, яка може складатись з механічної суміші окремих компонентів, двох або декількох твердих розчинів різного типу, твердого розчину та хімічної сполуки.

3.3. Діаграми стану двокомпонентних сплавів

Описують фазовий склад сплавів в залежності від температури та концентрації компонентів *діаграми стану*. Діаграми стану будують за результатами термічного аналізу. Термічний аналіз полягає у визначенні температур фазових перетворень (критичних точок) за даними спостережень зміни температури металу, чи сплаву під час його нагрівання, чи охолодження. Будь-яке перетворення в металі – плавлення, кристалізація, поліморфне перетворення, виділення надлишкової фази, чи її розчинення обов'язково супроводжується тепловими ефектами. На кривих охолодження (чи нагрівання) формується сходинка, якщо перетворення відбувається при постійній температурі, або згин (змінюється швидкість охолодження), якщо перетворення відбувається в інтервалі температури.

Температури початку та кінця фазових перетворень називають *критичними*, а відповідні їм точки на кривих охолодження – *критичними точками*.

На рис. 3.2, а зображена крива охолодження чистого металу.

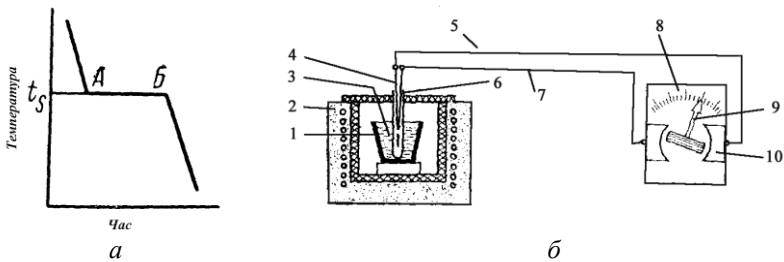


Рис. 3.2 – Крива охолодження чистого металу (а) і схема установки для проведення термічного аналізу (б)
 (1 – тигель для сплаву; 2 – електроніч; 3 – розплав; 4 – термопара;
 5, 7 – провідники; 6 – кришка; 8 – шкала гальванометра;
 9 – стрілка гальванометра; 10 – гальванометр)

На кривій охолодження чітко видно, що під час кристалізації виділяється певна кількість теплоти, яка припиняє зниження температури і спричиняє формування сходинки.

Правило фаз дозволяє перевірити правильність побудови кривих охолодження:

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

де C – число степенів вільності системи або число факторів рівноваги (концентрація, температура), які можуть змінюватись, не змінюючи при цьому числа фаз; K – число компонентів системи (це речовини, які утворюють цю систему); Φ – число фаз, що співіснують одночасно.

Для рис. 3.2 на ділянці $a-b$ число степенів вільності системи дорівнює $C = K + 1 - \Phi = 1 + 1 - 2 = 0$, тобто кристалізація металу відбувається за постійної температури.

Для побудови діаграми стану заданої системи необхідно побудувати велику кількість експериментальних кривих охолодження для сплавів різного хімічного складу, які належать до цієї системи.

На рис. 3.3 зображені криві охолодження сплавів системи Sn–Zn:

- сплав 1 – 100 % Sn;
- сплав 2 – 95 % Sn + 9 % Zn;
- сплав 3 – 91 % Sn + 9 % Zn;
- сплав 4 – 70 % Sn + 30 % Zn;
- сплав 5 – 50 % Sn + 50 % Zn;
- сплав 6 – 100 % Zn.

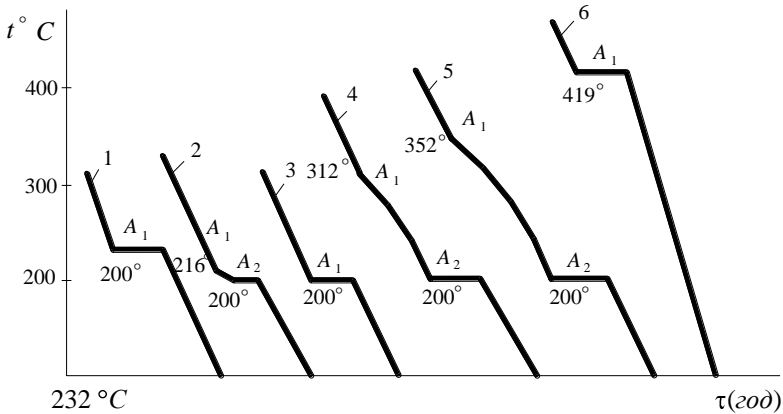


Рис. 3.3 – Криві охолодження сплавів системи Sn–Zn

Сплав 1 – вище температури A_1 знаходиться в рідкому стані, нижче – у твердому. Кристалізація відбувається при постійній температурі A_1 (232 °C).

Сплав 2 – при температурах вищих за A_1 в рідкому стані. В інтервалі A_1 – A_2 (216–200 °C) відбувається кристалізація. Нижче температури A_2 сплав у твердому стані.

Сплав 3 – подібно до сплаву 1 кристалізується при постійній температурі A_1 (200 °C).

Сплави 4 та 5 – кристалізуються в інтервалі температур A_1 – A_2 , відповідно (312–200 °C) та (352–200 °C).

Сплав 6 – кристалізується при постійній температурі A_1 (419 °C).

Для побудови діаграми стану системи Sn–Zn проводимо координатні вісі, де відкладаємо температури фазових перетворень (ордината) та концентрацію сплавів (абсциса), рис. 3.4, а.

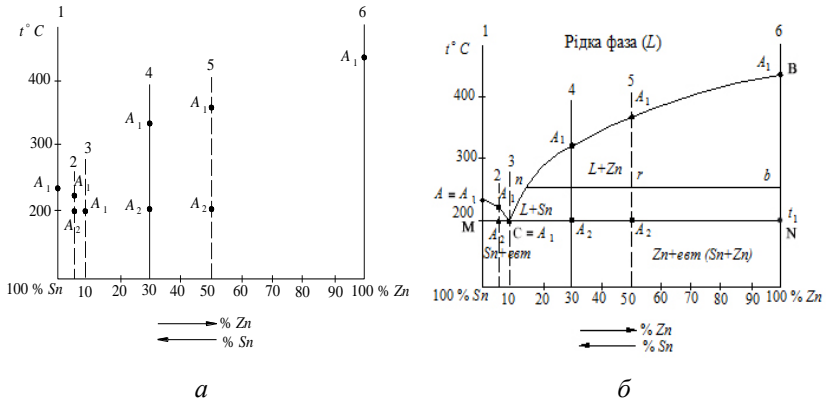


Рис. 3.4 – Приклад побудови діаграми стану за критичними точками:
а – критичні точки на ординатах досліджуваних сплавів;
б – діаграма стану системи Sn–Zn

Вісь концентрацій розділимо на сто частин. Крайня ліва точка відповідає 100 % Sn, крайня права – 100 % Sn. Склад будь-якого сплаву визначається точкою на цій осі. Вміст цинку в сплаві збільшується зліва направо, а олова, навпаки, справа наліво.

Знаходимо на концентраційній осі необхідні сплави і проводимо відповідні вертикалі. Переносимо на них критичні точки. На вертикаль 1 переноситься точка A_1 (232 °C). Для сплаву 2 переносимо дві точки: A_1 (216 °C) – початок та A_2 (200 °C) – кінець кристалізації. Для сплаву 3 – одну точку A_1 (200 °C), для сплаву 4: дві точки A_1 (312 °C) та A_2 (200 °C), для сплаву 5 – теж дві точки A_1 (352 °C) та A_2 (200 °C) і для сплаву 6 – одну точку A_1 (419 °C).

Плавними лініями з'єднуємо експериментальні точки, які мають однаковий фізичний зміст. Тоді верхня крива, яка з'єднує т. A_1 відповідає температурам початку процесу кристалізації (чи кінця плав-

лення). Тобто всі сплави цієї системи вище цієї лінії знаходяться в рідкому стані.

Лінія, вище якої всі сплави знаходяться в рідкому стані, називається лінією ліквідусу.

Нижня лінія, яка з'єднує всі точки A_2 відповідає температурам кінця кристалізації. Ці всі точки теж мають однаковий фізичний зміст: вони характеризують кінець процесу кристалізації (чи початку плавлення).

Лінія, нижче якої всі сплави знаходяться в твердому стані називається, лінією солідуса.

На діаграмі можна виділити три області: рідкого стану (вище лінії ліквідусу), твердого (нижче лінії солідуса) та двофазні області між лініями ліквідусу та солідуса, де існують рідка та тверда фази. Дані термічного аналізу доповнюються мікроструктурними та рентгеноструктурними дослідженнями, які дозволяють з'ясувати склад та будову кристалів твердої фази, що утворюється в процесі кристалізації. Так, ліворуч між кривою ліквідусу та лінією солідуса знаходяться рідка фаза та кристали Sn, праворуч – рідка фаза та кристали Zn. Нижче лінії солідуса сплави складаються з суміші кристалів компонентів Sn та Zn.

Аналіз діаграми стану. Розглянемо перетворення, що відбуваються в сплавах при охолодженні.

Сплав 2 – вище температури A_1 буде в рідкому стані, складається з однієї фази. При температурі A_1 починається виділення кристалів Sn. В інтервалі A_1 – A_2 у зв'язку з виділенням кристалів Sn рідкий сплав збіднюється оловом. Склад рідкої фази змінюється на відрізьку AC . При температурі A_2 сплав складається з кристалів Sn та рідкої фази, склад якої відповідає точці $C(L_c)$. При температурі A_2 рідка фаза починає кристалізуватися з одночасним утворенням кристалів Sn та Zn. При температурі A_2 сплав повністю кристалізується і складається з первинних кристалів олова та механічної суміші більш дрібних кристалів олова та цинку.

Механічну суміш кристалів, які одночасно випадають з рідкої фази називають **евтектикою**. Тобто структура сплаву 2 після кристалізації складається з первинних кристалів Sn та евтектики (Sn + Zn). Подібну структуру будуть мати всі сплави, що розташовані ліворуч від точки C . Різниця в структурі буде визначатися співвідношенням кількості первинних кристалів та евтектики.

Сплав 3 має евтектичний склад. Вище температури A_1 – сплав в рідкому стані, нижче A_1 – в твердому, тобто, кристалізація цього сплаву відбувається за постійної температури A_1 з утворенням суміші кристалів олова та цинку (евтектики).

3. Яку структуру мають сплави, що складаються з розчинених один в одному компонентів A і B , за умов, що концентрація компонента B більша за концентрацію компонента A ?

- а) α – твердий розчин; в) β – твердий розчин; д) A_mB_n .
б) $\alpha + \beta$; г) $A + B$;

4. До якого типу належать металічні сплави, що утворені компонентами A і B , якщо в структурі сплаву зберігаються кристалічні решітки кожного компонента?

- а) тверді розчини; в) хімічні сполуки; д) двофазні.
б) механічна суміш; г) двокомпонентні;

5. Які сплави кристалізуються за постійної температури?

- а) доевтектичні; г) із структурою твердого розчину;
б) заевтектичні; д) сплави з необмеженою розчинністю
в) евтектичні; компонентів в твердому стані.

6. Як називають складові металічного сплаву?

- а) компоненти; б) метали; в) елементи; г) фази; д) тверді розчини.

7. У яких координатах будують діаграми стану подвійних сплавів?

- а) температура – час;
б) температура – концентрація компонентів;
в) деформація – навантаження;
г) концентрація компонентів – швидкість охолодження;
д) температура – швидкість охолодження.

8. Які фазові перетворення можуть відбуватися в сплавах у твердому стані?

- а) евтектична кристалізація; г) рекристалізація;
б) зниження температури; д) перитектичне перетворення.
в) поліморфні;

9. Як називається лінія на діаграмі стану подвійних сплавів, нижче якої всі сплави знаходяться у твердому стані?

- а) солідус; г) евтектичного перетворення;
б) перитектичного перетворення; д) евтектоїдного перетворення.
в) ліквідус;

10. Як називається лінія на діаграмі стану подвійних сплавів, вище якої всі сплави знаходяться у рідкому стані?

- а) солідус; г) евтектичного перетворення;
б) перитектичного перетворення; д) евтектоїдного перетворення.
в) ліквідус;

11. Який запис відповідає евтектичній кристалізації?

- а) $A + B = A(B)$; г) L_c (при $t = \text{const}$) = $A + B$;
б) $L + \beta$ (при $t = \text{const}$) = $L + \alpha$; д) γ (при $t = \text{const}$) = $\alpha + \alpha^1$.
в) $A + B = A_m B_n$;

12. Яку структуру мають сплави, що складаються з компонентів A і B , які необмежено розчиняються один в одному, якщо концентрація компонента B більша за концентрацію компонента A ?

- а) α – твердий розчин; г) $(\alpha + \beta)$ – механічна суміш;
б) $(B + A)$ – механічна суміш; д) $A_m B_n$ – хімічна сполука.
в) β – твердий розчин;

13. Яку структуру мають сплави, що складаються з нерозчинних один в одному компонентів A і B , при евтектичній концентрації?

- а) $(\alpha + \beta)$ – механічна суміш; г) $(A + A_m B_n)$ – механічна суміш;
б) $(A + B)$ – механічна суміш; д) $(B + A_m B_n)$ – механічна суміш.
в) $A_m B_n$ – хімічна сполука;

14. Компонент A має решітку ОЦК, компонент B – решітку ГЦК. Чи можуть вони утворити твердий розчин з необмеженою розчинністю?

- а) так;
б) так, якщо компонента A буде в сплаві не менше 80 %;
в) ні;
г) можуть, якщо атомні радіуси компонентів відрізняються не більше ніж на 8–15 %;
д) можуть, якщо температури плавлення цих компонентів близькі.

15. Чому евтектичні сплави кристалізуються за постійної температури?

- а) температури кристалізації компонентів мало відрізняються одна від одної;
б) в рівновазі знаходиться три фази тому $C = 0$, процес відбувається при $T = \text{const}$;
в) виділяється велика кількість скритої теплоти кристалізації;
г) дуже повільно відводиться тепло;
д) швидкість росту кристалів дуже мала.

16. Чи наслідую хімічна сполука кристалічну решітку одного з компонентів сплаву?

- а) так;
б) утворюється нова кристалічна решітка;
б) ні;
г) кристалічні решітки вихідних компонентів об'єднуються;
д) решітка одного з компонентів стає більш щільною.

17. Які з цих фаз є інтерметалічними сполуками?

- а) Fe_3C ; б) Mo_2C ; в) $\text{Sn}+\text{Zn}$; г) $\beta + \alpha$; д) MgNi_2 .

18. У чому фізичний зміст числа степеня вільності «С»?

- а) не має фізичного змісту, це умовна величина, яку ввели в термодинаміку сплавів як коефіцієнт;
б) враховує число компонентів, які можна додати в сплав, щоб він кристалізувався за постійної температури;
в) враховує число компонентів, які можна додати в сплав, щоб температурний інтервал кристалізації сплаву був мінімальним;
г) фізичний зміст – воно враховує число зовнішніх факторів, зміна яких не призводить до зміни рівноваги в системі;
д) показує кількість фаз, які можуть утворитися в сплаві.

19. Кристалізація подвійного сплаву за постійної температури можлива при:

- а) кристалізації доперитектичних сплавів;
б) кристалізації заевтектичних сплавів;
в) кристалізації евтектичних сплавів;
г) постійній температурі кристалізуються тільки чисті метали, а не сплави;
д) кристалізації доевтектичних сплавів.

20. Чим пояснити наявність дендритної ліквіації при кристалізації твердих розчинів?

- а) малою швидкістю руху атомів домішок;
б) малою швидкістю охолодження та уповільненою дифузією атомів компонентів сплаву;
в) високою швидкістю охолодження та утрудненою дифузією компонентів;
г) наявністю значної кількості шкідливих домішок в сплаві;
д) утворенням дендритної форми кристалів.

21. Яка з цих реакцій відповідає евтектоїдному перетворенню?

- а) $L + b = a$; б) $L + A = L + a$; в) $b = a + y$; г) $L = A + B$; д) $a = B + A_m B_n$.

22. У чому суть вторинної кристалізації?

- а) з раніше закристалізованої фази виділяються кристали більш легкоплавкого компонента;
б) у кристалах тугоплавкого компонента відбувається поліморфне перетворення, з утворенням механічної суміші кристалів;
в) відбувається повна заміна однієї кристалічної структури на іншу;
г) виділяється надлишкова фаза, внаслідок зменшення розчинності одного компонента в іншому;
д) утворенні механічної суміші кристалів.

23. Скільки фаз знаходиться в рівновазі під час перитектичного перетворення?

- а) одна; б) дві; в) три; г) чотири; д) п'ять.

24. Що таке «критична точка»?

- а) точка на кривій охолодження, де крива змінює кут нахилу;
б) мінімальна температура початку утворення будь-якої фази;
в) мінімальна температура початку кристалізації;
г) температура початку чи кінця фазового перетворення;
д) теоретична температура кристалізації.

25. Сформулюйте правило фаз:

- а) встановлює кількісну залежність між компонентами та фазами в сплаві;
б) встановлює залежність між числом незалежних факторів та кількістю фаз в сплаві;
в) показує число незалежних факторів, які можна змінити не порушуючи рівноваги в системі;
г) показує скільки фаз може утворитися в системі;
д) показує за яких умов утворюється дрібнозерниста структура.

26. Як визначають критичні точки?

- а) за зміною твердості сплаву під час нагрівання;
б) з кривих охолодження – це є тангенс кута нахилу кривої охолодження до осі X ;
в) за температурними зупинками та перегинами на кривих охолодження чи нагрівання;
г) за температурою початку кристалізації сплаву;
д) це є температура, яка забезпечує кристалізацію при постійній температурі.

27. Чи можливе нагрівання або охолодження сплаву, якщо число степенів вільності $C = 1$?

- а) систему можна нагрівати до температури плавлення; г) так;
б) систему можна охолоджувати до кінця кристалізації; д) ні.
в) система знаходиться у рівновазі;

28. Які фази утворюються в системі Sn–Zn?

- а) рідка і тверда (кристали Sn і Zn); г) рідка фаза і кристали Sn;
б) тверді розчини і рідка фаза; д) кристали Zn і рідка фаза.
в) хімічні сполуки і рідка фаза;

29. Скільки фаз знаходиться в рівновазі під час кристалізації евтектичного сплаву?

- а) одна; б) дві; в) три; г) чотири; д) п'ять.

30. Які умови кристалізації чистих металів?

- а) $P = \text{const}, T = \text{const}$; г) $P \neq \text{const}, T \neq \text{const}$;
б) $P \neq \text{const}, T = \text{const}$; д) контрольоване охолодження системи.
в) $P = \text{const}, T \neq \text{const}$;

31. За яких умов утворюються в сплавах тверді розчини?

- а) компоненти сплаву повинні мати різний тип кристалічних решіток;
б) атоми компонентів мають суттєво відрізнятися за розмірами та характером міжатомного зв'язку;
в) кристалічні решітки компонентів сплаву мають бути ізоморфними;
г) компоненти сплаву повинні мати однакову валентність та малі відмінності в розмірах атомів;
д) компоненти мають мати ізоморфні кристалічні решітки, атомні радіуси мають відрізнятися не більше ніж на 8–15 %, мають перебувати в одній групі періодичної таблиці хімічних елементів Д.М. Менделєєва.

32. Який з цих записів відповідає правилу фаз?

- а) $F = U - TS$; в) $C = K + 1 - \Phi$ д) $t = aT_{\text{пл}}$.
б) $R = 2G/f$; г) $P \neq \text{const}, T \neq \text{const}$;

33. Що називають твердим розчином?

- а) сплав, який утворений компонентами A і B ;
б) кристалічні фази сталого складу, які містять домішки іншого компонента;
в) фази змінного складу, які містять атоми двох компонентів;
г) кристалічні фази змінного складу, де атоми другого компонента знаходяться в просторовій решітці першого;
д) фази, які знаходяться в твердому агрегатному стані.

34. Критичні точки, практично, використовують для:

- а) побудови діаграм стану;
б) побудови кривих нагрівання;
в) побудови кривих охолодження;
г) визначення кількості фаз в сплаві;
д) визначення хімічного складу сплаву.

35. Чим відрізняється кристалізація доевтектичних сплавів від кристалізації евтектичних сплавів в системі Sn–Zn?

- а) не відрізняються: спочатку утворюються центри кристалізації, а потім вони ростуть;
б) кристалізація доевтектичних сплавів починається з утворення кристалів олова, а закінчується кристалізацією евтектики, а евтектичні сплави кристалізуються з утворенням суміші кристалів олова та цинку;
в) доевтектичні сплави кристалізуються з меншою швидкістю, а евтектичні з більшою;

- г) у доевтектичних сплавів утворюються стовбчасті кристали, а у евтектичних – дрібнозернисті;
 д) доевтектичні сплави мають одну критичну точку, а евтектичні – дві.

36. Чи можливе нагрівання або охолодження системи, якщо число степенів вільності дорівнює $C = 2$?

- а) можливо за умов введення модифікаторів; г) ні;
 б) можливо, якщо компонента A в сплаві більше 20 %; д) так.
 в) можливо, якщо в системі утворюються тверді розчини;

Варіанти завдань самостійної роботи

1. Накреслити діаграму стану системи. Тип діаграми і номер сплаву вибирають з таблиці 3.1, відповідно до свого варіанта, а рисунок діаграми стану – з додатка А.

Таблиця 3.1

| Варіант | Діаграма стану системи | Склад сплаву |
|---------|---------------------------|--------------|
| 1 | Cu–Ag (мідь–срібло) | 20 % Ag |
| 2 | Fe–Cu (залізо–мідь) | 30 % Cu |
| 3 | Cu–Ni (мідь–нікель) | 30 % Cu |
| 4 | Cu–As (мідь–миш'як) | 25 % Cu |
| 5 | Pb–Sb (свинець–сурма) | 60 % Sb |
| 6 | Pb–Sn (свинець–олово) | 10 % Pb |
| 7 | Fe–As (залізо–миш'як) | 20 % Fe |
| 8 | Fe–Si (залізо–кремній) | 20 % Si |
| 9 | Fe–P (залізо–гантал) | 7 % Ta |
| 10 | Mg–Ge (магній–германій) | 40 % Ge |
| 11 | Mg–Ca (магній–кальцій) | 50 % Ca |
| 12 | Sn–Zn (олово–цинк) | 7 % Zn |
| 13 | Cd – Zn (кадмій–цинк) | 40 % Zn |
| 14 | Fe – В (залізо–бор) | 12 % В |
| 15 | Fe – P (залізо–фосфор) | 7 % P |
| 16 | Al–Si (алюміній–кремній) | 40 % Si |
| 17 | Fe–V (залізо–ванадій) | 12 % V |
| 18 | Fe–W (залізо–вольфрам) | 10 % W |
| 19 | Fe–Zr (залізо–цирконій) | 30 % Fe |
| 20 | Sb–Ge (сурма–германій) | 30 % Ge |
| 21 | Fe–Sb (залізо–сурма) | 15 % Sb |
| 22 | Al–Ge (алюміній–германій) | 15 % Ge |
| 23 | Fe–Pu (залізо–плутоній) | 20 % Fe |
| 24 | Fe–Nb (залізо–ніобій) | 40 % Nb |
| 25 | Al–Cu (алюміній–мідь) | 45 % Cu |

2. Описати взаємодію компонентів в твердому стані, заповнити фазові області діаграми, показати структурні складові в усіх областях.
3. Побудувати криву охолодження з використанням правила фаз для заданого сплаву.
4. Визначити для заданого сплаву при температурі між лініями ліквідус та солідус склад та кількісне співвідношення фаз.
5. Пояснити характер зміни властивостей у цій системі за правилом М.С. Курнакова.

Приклад виконання самостійного завдання

1. Викреслити діаграму стану системи Cu–Ni, заповнити фазові області діаграми, показати структурні складові в усіх областях.
2. На діаграмі провести лінію сплаву, що містить 50 % Cu і 50 % Ni.
3. Для заданого сплаву описати перетворення, що відбуваються при охолодженні його від рідкого стану до кімнатної температури.
4. Побудувати криву охолодження (з використанням правила фаз).
5. Визначити при температурі між лініями ліквідус та солідус склад та кількісне співвідношення фаз.
6. Пояснити характер зміни властивостей в цій системі згідно з правилом Курнакова М.С.

Відповідь. Викреслюємо діаграму стану системи Cu–Ni (рис. 3.5).

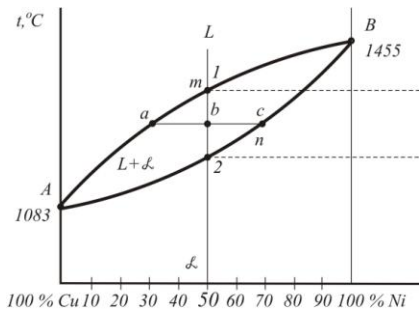


Рис. 3.5 – Діаграма стану системи Cu–Ni

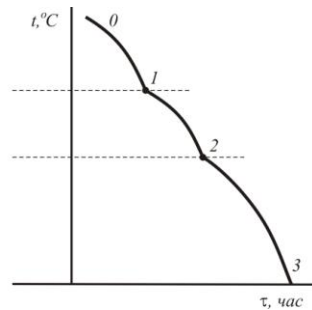


Рис. 3.6 – Крива охолодження заданого сплаву

Діаграма стану Cu–Ni належить до діаграм II типу, коли компоненти в рідкому та твердому стані необмежено розчиняються один в одному. В системі утворюється одна тверда фаза: α -твердий розчин на базі компонента Cu. Згідно з завданням проводимо лінію сплаву, який містить 50 % Cu і 50 % Ni. Кристалізація сплаву починається при тем-

пературі точки 1 з утворенням кристалів α -твердого розчину, закінчується кристалізація при температурі точки 2 також з утворенням цих кристалів. Коли закінчується кристалізація сплав буде мати структуру – α -твердого розчину, яка зберігається до кімнатної температури.

Крива охолодження для заданого сплаву має вигляд (див. рис. 3.6), де видно два згини, які відповідають температурам початку та кінця кристалізації.

Згідно з правилами фаз для ділянки 0–1 число степенів вільності дорівнює: $C = 2 + 1 - 1 = 2$; для ділянки 1–2 – $C = 2 + 1 - 2 = 1$; для ділянки 2–3 – $C = 2 + 1 - 1 = 2$.

Крива побудована правильно, так як система має одну або дві степені вільності, тобто процеси відбуваються при зміні температури.

Для визначення кількісного співвідношення фаз при температурі між лініями ліквідус та солідус проводимо коноду (ac) до перетину з лініями діаграми. Лінія сплаву ділить коноду на два відрізки, лівий av – відповідає кількості твердої фази, а правий vc – кількості рідкої фази. Вся конода – відповідає 100 % сплаву. Тоді кількість рідкої і твердої фази знаходимо:

$$\text{– кількість рідкої фази: } Q_{\text{рідка}} = \frac{\Delta \tilde{n}}{\Delta \tilde{n}} 100\%;$$

$$\text{– кількість твердої фази: } Q_{\text{тверда}} = \frac{\Delta b}{\Delta \tilde{n}} 100\%.$$

Згідно з залежностям Курнакова М.С. характер зміни властивостей в цій системі виглядатиме як показано на рис. 3.7.

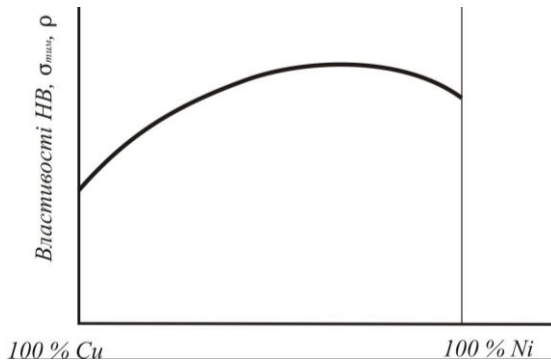


Рис. 3.7 – Характер зміни властивостей сплавів у системі Cu–Ni

При сплавленні компонентів Cu і Ni утворюються необмежені тверді розчини, отже властивості сплавів змінюються за криволінійним законом з максимумом (або мінімумом).

Тема 4.

Сплави на основі заліза та вуглецю. Діаграма стану системи «залізо-вуглець»

4.1. Теоретичні положення

У сучасній техніці, незважаючи на велику кількість неметалевих та композиційних матеріалів, найважливішими і найпоширенішими є залізовуглецеві сплави – сталі та чавуни.

Основними компонентами залізовуглецевих сплавів є залізо та вуглець.

Залізо поліморфний метал, який існує в двох алотропічних модифікаціях – Fe_{α} та Fe_{γ} .

До 911 °C існує Fe_{α} , яке має решітку ОЦК з періодом $a = 0,286$ нм. В інтервалі температур 911–1392 °C існує Fe_{γ} , з решіткою ГЦК, період якої $a = 0,363$ нм. Більше 1392 °C до температури плавлення (1539 °C) існує залізо з решіткою ОЦК, період якої 0,293 нм, його називають Fe_{δ} . Густина заліза $\gamma = 7,86 \cdot 10^3$ т/м³, міцність $\sigma_{тм} = 250\text{--}320$ МПа, пластичність $\delta = 40\text{--}50$ %, твердість НВ 750–900 МН/м².

Вуглець – також існує у двох алотропічних формах: алмазу та графіту. В залізовуглецевих сплавах вуглець знаходиться у вигляді твердих розчинів проникнення та графіту. Кристалічна решітка графіту – гексагональна з періодами $a = 1,42$ нм, $c = 3,40$ нм, густина – $2,5 \cdot 10^3$ т/м³. Твердість графіту НВ 30 МН/м².

Залізо та вуглець утворюють такі фази: **ферит, аустеніт, цементит**.

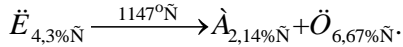
Ферит – твердий розчин проникнення вуглецю в Fe_{α} . Вміст вуглецю в фериті до 0,006 % (при 0 °C), 0,025 % (при 727 °C), 0,1 % (при 1499 °C). Міцність $\sigma_{тм} = 300$ МПа, відносне видовження $\delta = 40$ %, твердість НВ 800–1000 МН/м².

Аустеніт – твердий розчин проникнення вуглецю в Fe_{γ} . Вміст вуглецю до 2,14 % (при 1147 °C), 0,8 % (при 727 °C). Аустеніт існує при температурах вищих за 727 °C. Міцність $\sigma_{тм} = 600$ МПа, відносне видовження $\delta = 60$ %, твердість НВ 1800–2000 МН/м².

Цементит – хімічна сполука заліза з вуглецем Fe_3C . Вміст вуглецю – 6,67 %. Міцність $\sigma_{тм} = 2000$ МПа, $\delta = 0$ %, твердість НВ 8000 МН/м².

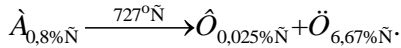
Основними структурними складовими залізовуглецевих сплавів є: **аустеніт, ферит, цементит, перліт, ледебурит**.

Ледебурит – механічна суміш аустеніту і цементиту, яка утворюється при евтектичній кристалізації рідкої фази з вмістом вуглецю 4,3 %.



Міцність ледобуриту $\sigma_{тим} = 1000$ МПа, відносне видовження $\delta = 1-2$ %, твердість НВ 7000 МН/м².

Перліт – механічна суміш фериту та цементиту; утворюється при евтектоїдному розпаді аустеніту з вмістом вуглецю 0,8 %:



Міцність перліту $\sigma_{тим} = 600$ МПа, відносне видовження $\delta = 20$ %, твердість НВ 2000 МН/м².

Лінії діаграми відповідають наступним фазовим перетворенням (рис. 4.1):

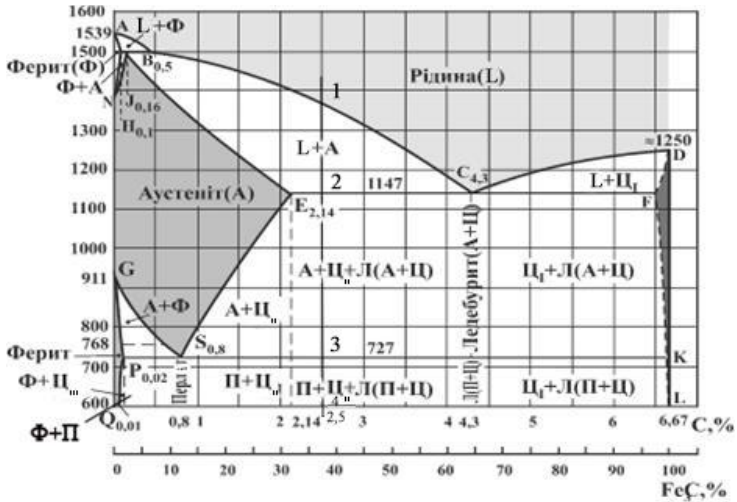
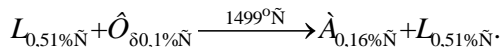


Рис. 4.1 – Діаграма стану «залізо–цементит»

Лінія ABCD – ліквідус. Вище цієї лінії всі сплави знаходяться в рідкому стані. Лінія ліквідус складається з трьох відрізків *AB*, *BC* і *CD*, які показують температури початку кристалізації відповідно δ -фериту (Φ_δ), аустеніту (*A*) та первинного цементиту (C_1).

Лінія AHJESCF – солідус, нижче цієї лінії всі сплави знаходяться в твердому стані. Лінія солідус складається також з декількох відрізків. Відрізок *AH* показує температуру кінця кристалізації δ -фериту, *JE* – температуру кінця кристалізації аустеніту, *ECF* (1147 °C) – температуру евтектичної кристалізації, в результаті якої утворюється ледобурит.

Лінія HJB (1499 °C) – температура перитектичного перетворення, внаслідок якого кристали δ-фериту взаємодіють з рідкою фазою і перетворюються на аустеніт.

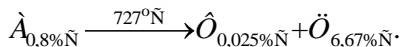


Лінія HN – температура початку, а **JN** – кінця поліморфного перетворення $Fe_{\delta} \rightarrow Fe_{\gamma}$ ($\Phi_{\delta} \rightarrow A$).

Лінія GS – температура початку, а **GP** – кінця поліморфного перетворення $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ ($A \rightarrow \Phi$).

Лінія ES показує граничну розчинність вуглецю в аустеніті – при охолодженні відбувається процес виділення C_{II} з аустеніту, а при нагріванні, навпаки – розчинення C_{II} в аустеніті.

Лінія PSK показує температуру евтектоїдного перетворення, внаслідок якого утворюється перліт:



Лінія PQ – граничну розчинність вуглецю в фериті. При охолодженні з фериту виділяється C_{III} , а при нагріванні, навпаки, – розчиняється.

Характеристика сплавів системи «залізо–цементит». На діаграмі виділяють три групи сплавів:

- технічне залізо – сплави заліза з вуглецем, які містять до 0,025 % C.
- сталі – сплави заліза з вуглецем, які містять від 0,025 до 2,14 % C.
- чавуни – сплави заліза з вуглецем, які містять від 2,14 до 6,67 % C.

4.2. Перетворення у сталях

Кристалізація сталей починається по лінії **ABC** – з рідкого розплаву утворюються кристали фериту чи аустеніту. Кінець кристалізації відбувається за температур, що відповідають лінії **АНУЕ**. У сталях, що містять до 0,8 % C, аустеніт зберігається до лінії **GS**, нижче якої починається перетворення Fe_{γ} у Fe_{α} , сталь отримує двофазну структуру (існує ферит і аустеніт). При охолодженні, кількість аустеніту зменшується, а фериту – збільшується. За температури 727 °C залишки аустеніту розпадаються на феритно-цементитну суміш (перліт). Структура сталі має ферит і перліт та не змінюється при охолодженні нижче 727 °C. У сталях, що містять від 0,8 до 2,14 % C, аустеніт зберігається до лінії **ES**.

Нижче її з аустеніту почне виділятися вуглець у вигляді вторинного цементиту (C_{II}). Цей процес відбувається до лінії PSK ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$), в аустеніті залишається $0,8\%$ C і він розпадається на перліт – утворюється структура сталі перліт та цементит вторинний, який у вигляді сітки розміщений навкруг перлітних зерен.

4.3. Перетворення у чавунах

Чавуни, які містять до $4,3\%$ вуглецю, починають кристалізуватися по лінії BC , з рідкого розплаву виділяються кристали аустеніту. В інтервалі температур між лініями ліквідус (ABC) і солідус (EF) відбувається кристалізація аустеніту. При температурі $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лінія EF) залишки рідкої фази кристалізуються з утворенням евтектичної суміші кристалів аустеніту та цементиту (ледебуриту). В інтервалі температур $1147\text{--}727\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається виділення цементиту вторинного з аустеніту. При температурі $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лінія PSK) аустеніт, що містить $0,8\%$ C розпадається на суміш фериту і цементиту, яку називають **перлітом**. При подальшому охолодженні структура не міняється і складається з перліту, цементиту вторинного та ледебуриту.

Чавуни, які містять більше $4,3\%$ C починають кристалізуватися по лінії CD , при цьому утворюються кристали первинного цементиту. При температурі $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лінія ECF) кристалізується евтектика – ледебурит. При подальшому охолодженні з аустеніту виділяється цементит вторинний, а при $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ з аустеніту утворюється перліт. Структура сплаву після охолодження – ледебурит та цементит первинний.

Сталі за структурою в рівноважному стані поділяють на доевтектоїдні, евтектоїдні та заевтектоїдні.

Доевтектоїдні сталі містять від $0,025$ до $0,8\%$ C . Структура таких сталей складається з світлих зерен фериту та темних зерен перліту. При збільшенні вмісту вуглецю кількість перліту зростає, а фериту зменшується.

Евтектоїдна сталь містить $0,8\%$ вуглецю і складається тільки з перліту.

Заевтектоїдні сталі містять від $0,8$ до $2,14\%$ C . Структура цих сталей – перліт та цементит вторинний. Збільшення кількості вуглецю сприяє збільшенню кількості C_{II} .

Механічні властивості сталей значно залежать від вмісту вуглецю. Збільшення вмісту вуглецю підвищує міцність та твердість сталі, а пластичність зменшує (див. рис. 4.2).

За структурою сталі можна приблизно визначити вміст вуглецю та її марку. Для цього орієнтовно визначають площу зайняту перлітом,

феритом, цементитом. Приймають вміст вуглецю в фериті рівним нулю, в перліті – 0,8 % С, в цементиті – 6,67 % С.

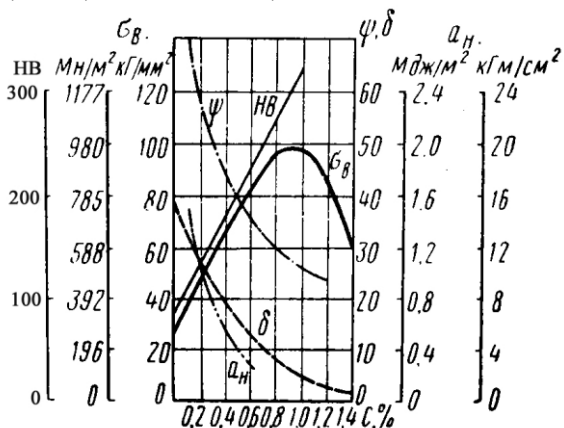


Рис. 4.2 – Вплив вмісту вуглецю на механічні властивості сталі

Наприклад, структура сталі складається з 25 % перліту, 75 % фериту, тоді вміст вуглецю у сталі можна визначити з пропорції:

100 % перліту – 0,8 % С, 25 % перліту – x % С, звідки:

$$x = \frac{25 \cdot 0,8}{100} = 0,2 \text{ \% С.}$$

Такий вміст вуглецю має конструкційна сталь марки «Сталь 20». Знайти точний вміст вуглецю в заевтектоїдній сталі таким чином дуже важко, так як при збільшенні вмісту вуглецю мало змінюється площа, зайнята цементитом і при розрахунках виникає велика похибка. Структура сталі визначає її властивості та галузі використання.

Чавуни, в яких вуглець міститься у вигляді хімічної сполуки – цементиту, називаються **білими**. Білі чавуни за структурою поділяють на доевтектичні (вміст вуглецю від 2,14 до 4,3 %), евтектичні (вміст вуглецю 4,3 %) та заевтектичні (вміст вуглецю від 4,3 до 6,67 %). Білі чавуни мають підвищену твердість та крихкість і застосовуються переважно для переробки в сталь.

Чавуни, в яких вуглець міститься у вигляді графіту, називаються **сірими**. Фазовий склад і структуру сірих чавунів вивчають з діаграми стану «залізо–графіт».

Сірі чавуни менш тверді і крихкі, вони містять підвищену кількість кремнію, який сприяє розпаду цементиту та утворенню графіту. Сірі чавуни залежно від форми графітних включень поділяють на сірий звичайний, високоміцний та ковкий чавун.

Форма графітних включень в сірих звичайних чавунах – пластинчаста, у високоміцних – куляста, а в ковких – пластівчаста. Графітні включення знаходяться в металевій основі і подібно тріщинам роз'єднують її, погіршують механічні властивості сплаву. Чим більше наближена форма графітних включень до кулястої, тим більша міцність чавуну. Чавун з кулястою формою графіту більш міцний, ніж звичайний сірий та ковкий.

На міцність чавунів помітно впливає будова металевої основи. Чавун може мати феритну, феритно-перлітну або перлітну структуру металевої основи. При збільшенні в структурі кількості перліту зростають міцність та твердість.

4.4. Аналіз перетворень у сталях та чавунах за кристалізації та охолодженні до кімнатної температури

I. Перетворення, які відбуваються в сплаві з 0,12 % С при його охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури.

Сплав, який містить 0,12 % вуглецю належить до доєвтектоїдних сталей. На діаграмі «залізо–цементит» проводимо лінію сплаву (рис. 4.3).

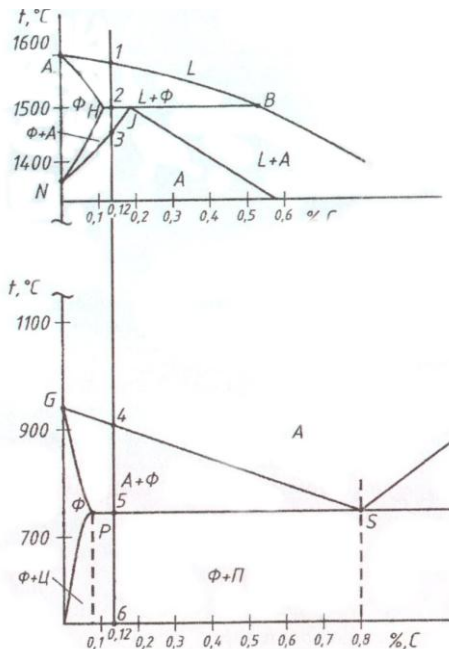
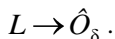
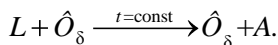


Рис. 4.3 – Кут діаграми «залізо–цементит», де розміщені сталі

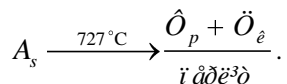
Сплав має п'ять критичних точок. При температурі точки 1 починається кристалізація: з рідкої фази виділяються кристали **фериту**:



Цей процес триває до температури точки 2. При температурі точки 2 (1499 °C) відбувається перитектичне перетворення, внаслідок якого утворюється **аустеніт**:



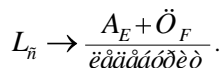
Подальше охолодження від точки 2 до точки 3 супроводжується перетворенням **фериту** на **аустеніт**. Нижче температури точки 3 структура сплаву **аустеніт**, вона зберігається до температури точки 4. При температурі точки 4 починається поліморфне перетворення $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$, внаслідок якого **аустеніт** перетворюється на **ферит**. Процес триває до температури точки 5. При температурі точки 5 (727 °C) відбувається евтектоїдне перетворення аустеніту на перліт:



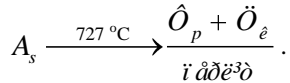
Отже, після охолодження структура сплаву буде – **ферит + перліт**.

2. Перетворення, які відбуваються в сплаві з 2,5 % вуглецю при його охолодженні від 1300 °C до кімнатної температури.

Сплав з 2,5 % вуглецю належить до білих доєвтектичних чавунів. На діаграмі «залізо–цементит» проводимо лінію заданого сплаву (див. рис. 4.3). Сплав має три критичних точки. Перетворення, які відбуваються в сплаві при охолодженні такі: при температурі точки 1 починається кристалізація з утворенням кристалів **аустеніту**. При температурі точки 2 відбувається евтектична кристалізація за такою реакцією:



Після закінчення кристалізації сплав має структуру – **аустеніт і ледебурит**. Наступне охолодження сприяє виділенню з аустеніту надлишкового вуглецю у вигляді цементиту вторинного. Отже, в інтервалі температур точок 2 та 3 структура сплаву – **аустеніт, цементит вторинний та ледебурит**. При температурі точки 3 концентрація вуглецю в аустеніті відповідає евтектоїдній (0,8 %) і тому при температурі точки 3 (727 °C) аустеніт розпадається на феритно-цементитну суміш – перліт за такою реакцією:



При подальшому охолодженні структура не змінюється і залишається – перліт + цементит вторинний + ледебурит.

4.5. Вплив легуючих елементів на положення точок діаграми «залізо–цементит»

Основними легуючими елементами у сталях є хром, нікель, молібден, вольфрам, ванадій, мідь тощо. Розподіл легуючих елементів може бути різним. Вони можуть розчинятися в кристалічній ґратці заліза та цементиту або утворювати спеціальні карбіди. Залежно від характеру взаємодії легуючих елементів із залізом їх поділяють на дві групи: α -стабілізатори, які розчиняються в Fe_α , утворюючи твердий розчин заміщення – *легований ферит*. До них відносять Cr, V, Mo, Nb, Zr, Ti, Si. Ці елементи підвищують критичну точку A_3 і знижують точку A_4 заліза, розширюючи таким чином область існування фериту. До другої групи належать γ -стабілізатори (Mn, Ni, Zn, Ru, Os), які розчиняються в Fe_γ , утворюючи *легований аустеніт*. Ці елементи знижують критичну точку A_3 і підвищують точку A_4 заліза. Завдяки їм область існування аустеніту розширюється.

З вуглецем легуючі елементи взаємодіють по-різному: одні з них вступають в реакцію, утворюючи хімічні сполуки – карбіди. Це вольфрам, ванадій, молібден, ніобій, титан. Їх називають *карбідотвірні*. Інші – кобальт, нікель, мідь, алюміній, бор не взаємодіють з вуглецем і не утворюють карбідів. Їх називають – *некарбідотвірні*. Вони розчиняються в фериті та аустеніті, змінюючи їх властивості.

Карбіди мають високу твердість, тому їх вплив на властивості сталі значний. Кількість карбідотвірного елемента, який розчиняється в фериті залежить від вмісту в сталі вуглецю. Якщо вуглецю в сталі дуже мало (до 0,04 %), то навіть найактивніші карбідотвірні елементи (V, Nb, Ti) будуть повністю розчинятися в фериті.

Природа карбідної фази в легованих сталях залежить від співвідношення атомних радіусів R_c та R_m (вуглецю та металу). Елементи з $R_c/R_m > 0,59$ (Mn, Cr), утворюють карбіди з складною будовою кристалічної решітки, наприклад: $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , Cr_4C_7 , Mn_3C . Такі карбіди при нагріванні під термічну обробку дисоціюють та розчиняються в аустеніті. Елементи з $R_c/R_m < 0,59$ (Mo, W, Nb, Zr, V, Ti), утворюють карбіди з простою кубічною кристалічною решіткою такі як W_2C , W_6C , WC , NbC , VC , TiC . Вони мають високі температури дисоціації тому не роз-

чиняються в аустеніті при нагріванні. Якщо сталь легована кількома карбідотвірними легуючими елементами, то можуть утворюватись складні карбіди: $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$, $(\text{V}, \text{Nb})\text{C}$, $(\text{W}, \text{Mo}, \text{Fe})_6\text{C}$. Складні карбіди переважно зустрічаються в високолегованих інструментальних сталях.

Всі легуючі елементи зсувають точки S та E діаграми «залізо–цементит» ліворуч, тобто в бік менших концентрацій вуглецю в перліті, збільшуючи його кількість в структурі. Леговані сталі за структурою в рівноважному стані поділяють на *доевтектоїдні*, *евтектоїдні* та *заевтектоїдні*.

Доевтектоїдні сталі мають структуру перліту і залишкового фериту, евтектоїдні – перлітну структуру, заевтектоїдні – перлітну з вторинними карбідами типу M_3C . У структурі *ледебуритних сталей* формується евтектика (ледебурит), яка утворена первинними карбідами та аустенітом. У сталях, які містять значну кількість α -стабілізаторів, зникає перетворення $\gamma \Rightarrow \alpha$. За кімнатної температури вони мають структуру фериту і належать до *феритного класу*. Сталі, які містять значну кількість γ -стабілізаторів, за кімнатної температури мають структуру аустеніту і відносяться до сталей *аустенітного класу*.

За *структурою після нормалізації* сталі поділяють на три основних класи – *перлітний*, *мартенситний*, *аустенітний*.

Сталі перлітного класу в *нормалізованому стані* мають структуру перліту, сорбіту або троститу. Вміст легуючих елементів в таких сталях не перевищує 5 %. В структурі доевтектоїдних сталей перлітного класу крім феритно-карбідної суміші присутній надлишковий ферит, а у структурі заевтектоїдних сталей – надлишкові вторинні карбіди.

Контрольні питання

1. Що таке сплав, компонент, фаза?
2. Що таке «критична точка»?
3. Який фізичний зміст лінії ліквідусу?
4. Який фізичний зміст лінії солідусу?
5. Що таке евтектика?
6. У чому полягає суть термічного аналізу металів та сплавів?
7. З яких причин на кривій охолодження формується сходінка?
8. Чим відрізняється кристалізація чистих металів від кристалізації сплавів?
9. Як кристалізується евтектичний сплав?
10. Охарактеризуйте компоненти залізовуглецевих сплавів.
11. Охарактеризуйте фази та структурні складові залізовуглецевих сплавів.

12. Поясніть фізичний зміст ліній діаграми Fe–Fe₃C.
13. Як поділяють сталі за структурою; вмістом вуглецю та призначенням?
14. Як поділяють чавуни за структурою і формою графітних включень?
15. Чим білі чавуни відрізняються від сірих?
16. Як легуючі елементи впливають на положення критичних точок діаграми «залізо–цементит»?
17. Маркування вуглецевих сталей та сірих чавунів.
18. Класифікація легованих сталей за структурою та призначенням.
19. Маркування легованих сталей.
20. Як впливають вуглець та постійні домішки на механічні властивості сталі?

Тестові завдання

Виберіть правильну відповідь

1. Які фази утворюються у залізовуглецевих сплавах?

- а) ферит, ледебурит, перліт; г) рідка і тверда;
 б) аустеніт, перліт, цементит; д) перліт, ледебурит.
 в) ферит, аустеніт, цементит;

2. Скільки вуглецю у фериті при кімнатній температурі?

- а) 0,1 % C; б) 0,025 % C; в) 0,006 % C; г) 6,67 % C; д) 4,3 % C.

3. До якої температури існує перліт?

- а) 500 °C; б) 727 °C; в) 210 °C; г) 1147 °C; д) 911 °C.

4. Максимальний вміст вуглецю в аустеніті:

- а) 0,8 % C; б) 4,3 % C; в) 0,16 % C; г) 2,14 % C; д) 6,67 % C.

5. У якому температурному інтервалі відбувається перетворення A → Ц_{II}?

- а) 911–727 °C; в) 1147–727 °C; д) 1147–911 °C.
 б) 1499–210 °C; г) 727–20 °C;

6. У яких сплавах присутній ледебурит?

- а) у доевтектоїдних сталях; г) у евтектоїдних сталях;
 б) у доевтектичних чавунах; д) у високовуглецевих сплавах.
 в) у заевтектоїдних сталях;

7. Чим відрізняються ледебурит і перліт?

- а) ледебурит має пластинчасту будову, а перліт – зернисту;
 б) ледебурит утворюється з рідкої фази – це суміш аустеніту та цементиту, перліт – з аустеніту і є сумішшю фериту та цементиту;

- в) ледебурит має пластинчасту будову, а перліт – зернисту;
- г) різним вмістом вуглецю;
- д) ледебурит – це суміш фериту та цементиту, а перліт – фериту та цементиту третинного.

8. Яке перетворення відбувається по лінії GS?

- а) $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$; б) $A \rightarrow \Phi + C$; в) $Fe_\gamma \rightarrow C_{II}$; г) $A \rightarrow \Phi$; д) $P \rightarrow A$.

9. Яка лінія на діаграмі Fe–Fe₃C відповідає температурі перетворення перліту в аустеніт?

- а) QP; б) PSK; в) SE; г) GS; д) ECF.

10. Що таке ледебурит?

- а) твердий розчин; в) надлишкова фаза; д) компонент сплаву.
б) механічна суміш; г) хімічна сполука;

11. Які структурні складові входять до складу ледебуриту при кімнатній температурі?

- а) $\Phi + C$; б) $A + C$; в) $P + L$; г) $L + C_{II}$; д) $L + C_I$.

12. Що є твердим розчином?

- а) ферит; б) цементит; в) перліт; г) ледебурит; д) аустеніт.

13. Що таке цементит?

- а) механічна суміш Fe та C; г) твердий розчин вуглецю у Fe_δ;
б) хімічна сполука Fe₃C; д) твердий розчин вуглецю у Fe_γ.
в) твердий розчин вуглецю у Fe_α;

14. У якому температурному інтервалі у сталях відбувається перетворення Fe_α → Fe_γ?

- а) 911–1147 °C; в) 727–911 °C; д) 1499–1147 °C.
б) 1539–727 °C; г) 727–1147 °C;

15. У якому температурному інтервалі відбувається перетворення A → C_{II}?

- а) 911–727 °C; в) 1147–727 °C; д) 911–1147 °C.
б) 1499 °C; г) 727–2 °C;

16. Яке перетворення відбувається в сплаві, що містить 1,6 % C в інтервалі температур 900–727 °C?

- а) $P \rightarrow A$; б) $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$; в) $A \rightarrow \Phi + C$; г) $A \rightarrow C_{II}$; д) $A \rightarrow \Phi$.

17. До якої структурної групи належить сталь У8?

- а) низьковуглецевої; в) високовуглецевої; д) заевтектоїдної.
б) евтектоїдної; г) конструкційної;

18. До якої структурної групи належить сталь 60?

- а) конструкційної; в) доевтектоїдної; д) вуглецевої.
б) феритно-перлітної; г) евтектоїдної;

19. Який максимальний вміст вуглецю у сталях?

- а) 0,8 %; б) 1,5 %; в) 1,8 %; г) 2,14 %; д) 4,3 %.

20. Яка концентрація вуглецю поділяє сплави на сталі та чавуни?

- а) 0,8 % С; б) 2,14 % С; в) 4,3 % С; г) 6,67 % С; д) 0,006 % С.

21. Як класифікують сталі за структурою?

- а) доевтектичні, евтектичні, заевтектичні;
б) конструкційні та інструментальні;
в) феритно-перлітні, перлітні, перліто-цементитні;
г) доевтектоїдні, евтектоїдні, заевтектоїдні;
д) низько-, середньо-, високовуглецеві.

22. Який сплав має структуру: перліт та цементит?

- а) доевтектичний чавун; г) заевтектичний чавун;
б) заевтектоїдна сталь; д) евтектоїдна сталь.
в) доевтектоїдна сталь;

23. Яку структуру буде мати сплав, який містить 0,65 % С, при кімнатній температурі?

- а) ферит + аустеніт; в) перліт; д) ферит + перліт.
б) перліт + цементит; г) ферит + цементит;

24. Яку структуру може мати сталь при кімнатній температурі?

- а) ферит + аустеніт; г) аустеніт + цементит;
б) перліт + ферит; д) ледебурит + перліт + цементит.
в) перліт + цементит;

25. Яку структуру має сплав з 3,5 % вуглецю при 20 °С?

- а) ферит + перліт; г) перліт + цементит + ледебурит;
б) перліт + цементит; д) ледебурит.
в) перліт;

26. Яку структуру може мати сталь при 900 °С?

- а) аустеніт; б) ферит; в) цементит; г) ледебурит; д) перліт.

27. Чим відрізняється ВЧ 50–2 від СЧ 40?

- а) вмістом вуглецю: ВЧ 50–2 містить більше вуглецю;
б) структурою металевої основи: ВЧ 50–2 має перлітну основу, СЧ 40 – феритно-перлітну;

- в) формою графітних включень: в СЧ 40 – пластинчаста форма включень, а у ВЧ 50–2 – куляста;
г) твердістю;
д) кількістю графіту.

28. Яку структуру має сплав, що містить 1,8 % С в інтервалі температур, обмежених лініями ES та PSK?

- а) $\Phi + C_{II}$; б) $A + C_{II}$; в) $\Phi + P$; г) $A + L + C_{II}$; д) A .

29. За якою ознакою визначають належність чавуну до групи сірих звичайних, ковких чи високоміцних чавунів?

- а) кількістю графіту;
б) результатами хімічного аналізу;
в) структурою металевої основи;
г) формою графітних включень;
д) результатами вимірювання твердості.

30. Як впливають графітні включення на міцність чавуну?

- а) не впливають: міцність залежить від структури металевої основи;
б) при збільшенні кількості та розміру графітних включень міцність збільшується;
в) при зменшенні розміру графітних включень та зменшенні їх кількості міцність збільшується;
г) міцність чавуну зростає при зміні форми графітних включень від пластинчастої до кулястої;
д) міцність чавуну падає при зміні форми графітних включень від пластівчастої до кулястої.

31. З якою структурою сірий чавун має найвищі механічні властивості?

- а) феритною; г) перлітною;
б) феритно-перлітною; д) цементитною.
в) ледебуритною;

32. Як відрізнити ковкий чавун від сірого звичайного?

- а) вмістом вуглецю;
б) структурою металевої основи;
в) величиною твердості;
г) формою графітних включень;
д) розміром графітних включень.

33. Як розпізнати сірий, ковкий та високоміцний чавун?

- а) визначити кількість графіту;
б) визначити вміст вуглецю;
в) визначити форму графітних включень;
г) визначити структуру металевої основи.

34. Сплав має структуру, яка складається з 20 % фериту та 80 % перліту. Скільки вуглецю в цьому сплаві?

- а) 0,4 % С; б) 0,64 % С; в) 0,82 %; г) 1,8 % С; д) 1,2 % С.

35. До яких сплавів належить СЧ 20?

- а) доевтектоїдних сталей; г) ковких чавунів;
б) білих чавунів; д) вуглецевих сталей.
в) сірих чавунів;

36. Як записати марку сталі, структура якої складається з 10 % фериту та 90 % перліту?

- а) сталь 10; б) сталь У12; в) сталь У7; г) сталь 40; д) сталь 60.

37. Яку структуру може мати сталь при кімнатній температурі?

- а) ферит + аустеніт; г) аустеніт + цементит;
б) перліт + ферит; д) ледебурит + перліт + цементит.
в) аустеніт;

38. Розшифруйте СЧ 15:

- а) вміст вуглецю 1,5 %; г) вміст вуглецю 0,15 %;
б) $\sigma_{тим} = 150$ МПа; д) відносне видовження 15 %.
в) твердість НВ 150;

39. З якою формою графітних включень сірий чавун має найвищу міцність?

- а) пластинчастою; г) кулястою;
б) пластівчастою; д) видовженою.
в) кутастою

40. Яку структуру буде мати сплав, який містить 0,35 % С при кімнатній температурі?

- а) ферит + аустеніт; г) ферит + перліт;
б) перліт + цементит; д) ферит.
в) аустеніт;

Варіанти завдань самостійної роботи

1. Визначте, до якої структурної групи належить сталь 30. Опишіть структурні складові цього сплаву. За діаграмою стану «залізо-цементит» визначте кількість перліту в сталі.

2. Розшифруйте склад сплаву сталь 70; з яких структурних складових складається її структура. Надайте визначення цим структурним складовим. Визначте групу сталі за призначенням.

3. Розшифруйте марку сплаву СЧ 40. До якої групи сплавів він належить. Опишіть особливості його структури, галузі використання.

4. Сплав має структуру: перліт і цементит вторинний. Який орієнтовно склад цього сплаву. Визначте структурну групу сплаву.

5. Визначте, до якої структурної групи належить сплав зі структурою ледебуриту і цементиту первинного. Що таке ледебурит і як він утворюється?

6. Чому сплав ВЧ 500–7 міцніший за сплав КЧ 45–7. Поясніть різницю властивостей з урахуванням структури цих сплавів.

7. Визначити (орієнтовно) вміст вуглецю у сталевих зразках, якщо твердість одного НВ 120, а другого – НВ 180. Опишіть структурні складові в цих сталях.

8. Для дослідження надано два зразки чавуну з однаковою формою графітних включень. Один має твердість НВ 150, а другий – НВ 350. Пояснити, чому ці зразки мають різну твердість.

9. Розшифруйте марки сплавів СЧ 15 та СЧ 40. Визначте групу сплавів за призначенням. Поясніть, чому ці сплави мають різні властивості.

10. Яку структуру будуть мати сталь 10 і сталь 30, замалюйте її. Опишіть властивості структурних складових.

11. Замалюйте і опишіть структуру сталей У7 та У10. До яких структурних груп вони належать?

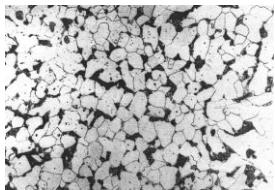
12. Розшифруйте марку сталі У8А. Поясніть, чим вона відрізняється від сталі марки У8. Визначте групу сталі за призначенням.

13. Поясніть, яка з наведених марок сталей міцніша – сталь У10 чи У10А. Визначте групу сталей за структурою та призначенням.

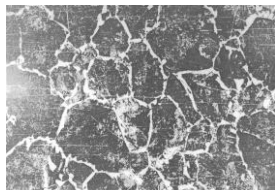
14. У сплавах з яким вмістом вуглецю присутній ледебурит. Дайте визначення цій структурній складовій, які її властивості.

15. У сплавах з яким вмістом вуглецю присутній цементит тритинний. Опишіть структуру цих сплавів. Поясніть вплив цементиту тритинного на властивості цих сплавів.

16. На рисунку показана мікроструктура сталі. Визначити за структурою вміст вуглецю, записати марку сталі. Описати структурні складові.



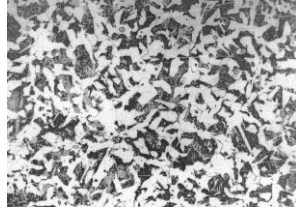
Варіант 16.1



Варіант 16.2

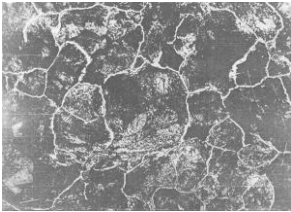


Варіант 16.3

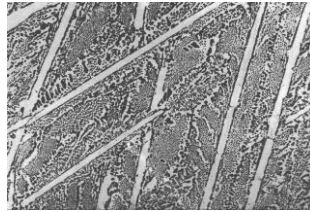


Варіант 16.4

17. На рисунку показана мікроструктура чавуну. Визначити структурну групу, орієнтовний вміст вуглецю. Описати структурні складові.

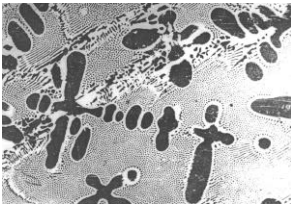


Варіант 17.1

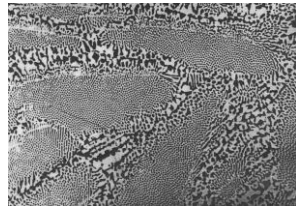


Варіант 17.2

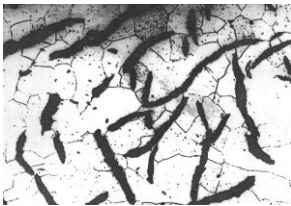
18. На рисунку показана мікроструктура чавуну. Визначити структурну групу, орієнтовний вміст вуглецю. Описати структурні складові. Записати марку чавуну.



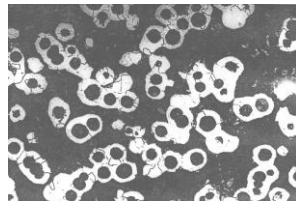
Варіант 18.1



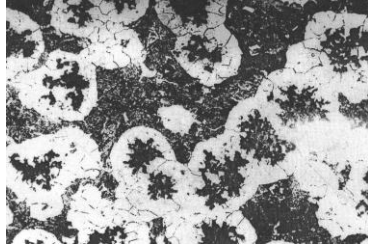
Варіант 18.2



Варіант 18.3



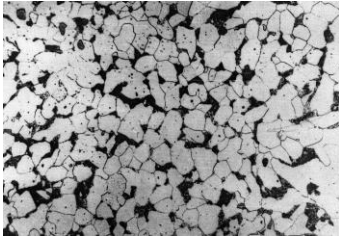
Варіант 18.4



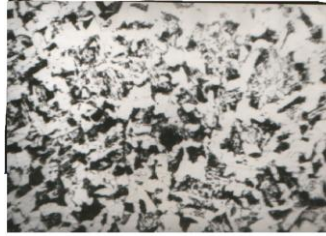
Варіант 18.5

19. Відповідно до стандартів сталь 40 містить до 0,65 % марганцю та 0,3 % хрому. Чи належить вона до групи легованих сталей.

20. Показана структура сталі 20 (а). Порівняйте її із структурою сталі 12ХН3А (б). Поясніть, як вплинула наявність легуючих елементів на структуру сталі.



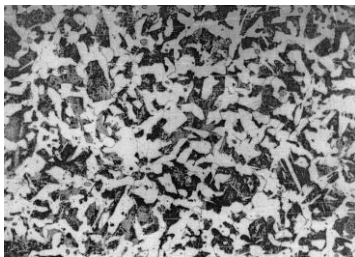
а – сталь 20



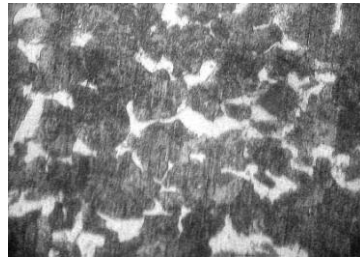
б – сталь 12ХН3А

Мікроструктури сталей (варіант 20)

21. Показана структура сталі 45 (а). Порівняйте із структурою сталі 40Х (б). Поясніть як вплинула наявність легуючих елементів на структуру сталі.



а – сталь 45



б – сталь 40Х

Мікроструктури сталей (варіант 21)

22. Показана структура сталі У8 (а), яка складається з перліту. Порівняйте її з структурою сталі 5ХНМ (б). Поясніть, чому хімічний склад сталей різний, а структури майже однакові.



а – сталь У8



б – сталь 5ХНМ

Мікроструктури сталей (варіант 22)

23. Запишіть марку сталі, якщо вона містить 0,6 % С; 2 % Si; 1,2 % Cr; 0,1 % V.

24. Запишіть склад сталі марки 3Х2В8.

25. Запишіть склад сталі марки 10Х18Н10Т.

26. Запишіть марку сталі, якщо вона містить 0,12 % С, 2 % Cr; 2 % Ni; 0,1 % V.

27. Запишіть марку сталі, якщо вона містить 0,3 % С; 1,2 % Cr; 2 % Mo.

28. Розшифруйте марку сталі 30ХГСА. Чи належить вона до групи середньолегованих сталей?

29. Розшифруйте марку сталі ШХ15СГ. До якої групи за вмістом легуючих елементів вона належить?

30. Розшифруйте марку сталі Р18К5Ф2. До якої групи за вмістом легуючих елементів вона належить?

31. Що таке карбіди, опишіть їх властивості. Які елементи утворюють карбіди? Наведіть приклади.

32. Які елементи в складі легуваних сталей не утворюють карбідів. Наведіть приклади. Опишіть, в яких фазах ці елементи знаходяться у сталях.

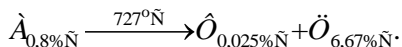
Приклади виконання самостійних завдань

Завдання 1. Розшифруйте марку сплаву сталь 30. Які структурні складові утворюють її структуру при кімнатній температурі? Дайте визначення цим структурним складовим. Визначте групу сталі за призначенням.

Відповідь. Сталь 30 містить 0,30 % вуглецю, так як число 30 вказує вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Це доєвтектоїдна сталь, яка при кімнатній температурі складається із зерен фериту та перліту.

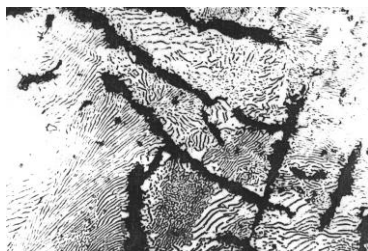
Ферит – це твердий розчин проникнення вуглецю в Fe_α . Вміст вуглецю – до 0,006 % при кімнатній температурі. Міцність $\sigma_{тм} = 300$ МПа, відносне видовження $\delta = 40$ %, твердість НВ 800–1000 МН/м². Ферит є фазою залізовуглецевих сплавів та структурною складовою. В сталі 30 ферит виявляється у вигляді світлих зерен.

Перліт – механічна суміш фериту та цементиту; утворюється при евтектоїдному розпаді аустеніту з вмістом вуглецю 0,8 %:



Перліт складається з двох фаз (фериту та цементиту), але є окремою структурною складовою, яку виявляють у сталях та чавунах за особливою формою та кольором (пластинчаста будова кристалів цементиту, темний колір). Перліт в сталі 30 виявляється у вигляді темних зерен. Перліт може мати форму цементитних часточок наближену до кульок, тоді такий перліт називають **зернистим**, він світлого кольору (переважно у високовуглецевих сталях). Міцність перліту $\sigma_{тм} = 600$ МПа, відносне видовження $\delta = 20$ %, твердість НВ 2000 МН. За призначенням сталь 30 належить до конструкційних сталей, з яких виготовляють шатуни, вали, зірочки, шестірні тощо.

Завдання 2. На рисунку зображена мікроструктура чавуну. Визначте структурну групу, орієнтовний вміст вуглецю. Опишіть структурні складові. Запишіть марку чавуну.

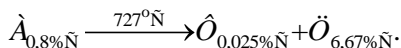


Мікроструктура чавуну

Відповідь. На рисунку наведена структура сірого чавуну. Форма графітних включень – пластинчаста. Структура металевої основи – перліт. Структурними складовими є графіт і перліт. Такі чавуни містять до 3,5 % вуглецю, до 2,5 % кремнію і належать до структурної групи перлітних сірих чавунів.

Вуглець виділяється у структурно вільному стані у вигляді графіту, кристали якого мають пластинчасту форму. Кристалічна ґратка графіту – гексагональна з періодами $a = 1,42$ нм, $c = 3,40$ нм, густина – $2,5 \cdot 10^3$ Т/м³. Твердість графіту НВ 30 МН/м².

Перліт – механічна суміш фериту та цементиту, утворюється при евтектоїдному розпаді аустеніту з вмістом вуглецю 0,8 %:



Перліт складається з двох фаз (фериту та цементиту), але є окремою структурною складовою, яку виявляють у сталях та чавунах за особливою формою та кольором (пластинчаста будова кристалів, темний колір). На рисунку перліт виявляється у вигляді темних зерен. Міцність перліту $\sigma_{\text{тим}} = 600$ МПа, відносне видовження $\delta = 20$ %, твердість НВ 2000 МН. Марка чавуну – СЧ 40.

Завдання 3. Поясніть, чому леговані сталі в рівноважному стані мають більш високу міцність ніж вуглецеві.

Відповідь. Як відомо, легуючі елементи у сталях можуть бути у твердому розчині, карбідній фазі та у вигляді інтерметалічних сполук. За наявності в твердому розчині легуючих елементів зменшується розмір зерна, розмір блоків мозаїки, крім того, легуючі елементи блокують дислокації і утруднюють їх переміщення під дією напружень зсуву. Це приводить до збільшення механічних характеристик сталі таких як $\sigma_{\text{тим}}$, $\sigma_{\text{т}}$, НВ. Легуючі елементи навіть при малих концентраціях в сталі сприяють утворенню дрібнозернистого фериту, що підвищує опір сталі крихкому руйнуванню. Карбідні та інтерметалічні сполуки також сприяють гальмуванню руху дислокацій в твердому розчині і зміцненню сталі.

Завдання 4. Розшифруйте марку сталі 4Х5В4ФСМ. Визначте групу сталі за вмістом легуючих елементів.

Відповідь. Сталь марки 4Х5В4ФСМ містить близько 0,4 % вуглецю; біля 5,0 % – хрому; 4 % – вольфраму, 1 % – ванадію, 1 % – кремнію та 1 % – молібдену. Сталь містить більше 10 % легуючих елементів, отже належить до групи високолегованих.

Тема 5. Основи термічної та хіміко-термічної обробки сталі

5.1. Теоретичні положення

Термічною обробкою називають технологічний процес, який складається з нагрівання виробу до заданої температури, витримки та його охолодження із заданою швидкістю. Термічна обробка дозволяє одержати необхідні властивості сталі, змінюючи її структуру без зміни складу. Теоретичною основою технології термообробки є теорія фазових перетворень, що проходять при нагріванні та охолодженні сталі.

Під час термічної обробки у сталях відбуваються наступні основні перетворення:

- 1) перліт в аустеніт при нагріванні;
- 2) аустеніт у феритно-цементитну суміш при охолодженні;
- 3) аустеніт у мартенсит при охолодженні;
- 4) розпад мартенситу на феритно-цементитну суміш при нагріванні (під час відпуску).

Лінії діаграми стану «залізо–цементит», які використовують для вибору виду та режиму термічної обробки сталі позначають так: лінія PSK – це точка A_{C_1} ; лінія GS – точка A_{C_3} ; лінія ES – точка A_{C_m} .

Перетворення перліту на аустеніт – при нагріванні сталі вище точки A_{C_1} . Цей процес відбувається внаслідок утворення зародків аустеніту з їх наступним ростом. Оскільки аустеніт і цементит різняться вмістом вуглецю, то процес має дифузійний характер і супроводжується переміщенням атомів вуглецю (рис. 5.1).

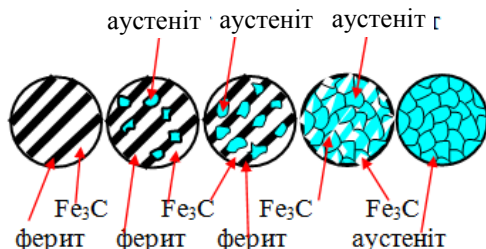
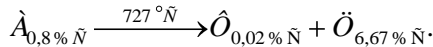


Рис. 5.1 – Схема утворення аустенітних зерен

Зародки аустенітних зерен виникають на границі розділення кристалів фериту та цементиту. Закінчується процес зникненням пер-

літу та утворенням аустеніту. Утворений аустеніт має неоднорідний склад, тому для забезпечення однорідності сталь необхідно нагріти вище A_{C3} або A_{Cm} і витримати до завершення дифузійних процесів.

Перетворення аустеніту на перліт – при його охолодженні нижче точки A_{C1} проходить розпад аустеніту на феритно-цементитну суміш:



Перетворення має дифузійний характер. Будова продуктів розпаду залежить від температури, за якої відбувається розпад, тобто від ступеня переохолодження аустеніту. Закономірність процесу описує діаграма ізотермічного розпаду аустеніту, вид якої визначається складом сталі. З діаграми (рис. 5.2) видно, що за температур, вищих точки A_{C1} , розміщується область стійкого аустеніту.

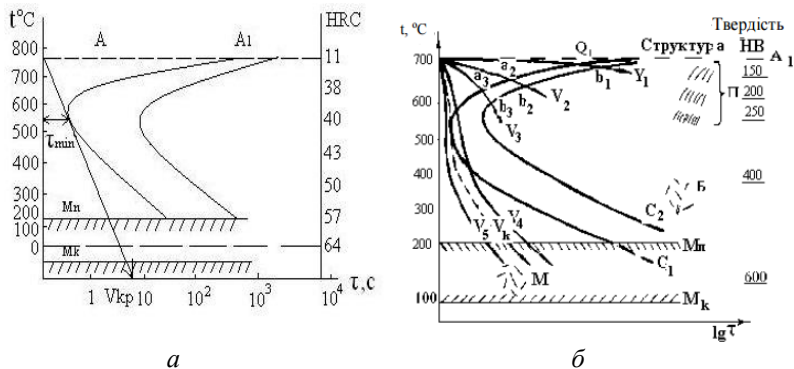


Рис. 5.2 – Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту евтектоїдної сталі У8 (а); накладання на ній ізотермічного розпаду кривих охолодження (б)

На діаграмі, С-подібні криві показують відповідно початок та кінець дифузійного розпаду аустеніту на феритно-цементитну суміш. За температур нижчих точки A_{C1} деякий час може існувати переохолоджений аустеніт, але по закінченню інкубаційного періоду починається його розпад на феритно-цементитну суміш. За температур близьких до 700°C утворюється грубо-пластинчаста феритно-цементитна структура – **перліт**, при 600°C – ще дрібніша суміш, яку називають **сорбіт**, при 500°C – дрібнозерниста суміш фаз фериту та цементиту

(*тростит*). За температур нижчих 500 °С аустеніт розпадається на бейніт, а за температур нижчих за 300 °С – аустеніт перетворюється на мартенсит. Залежно від характеру структур, що утворюються при розпаді аустеніту, на діаграмі виділяють три температурних інтервали: 1) перлітний (727 °С–500 °С); 2) бейнітний (500 °С– M_n); 3) мартенситний (M_n – M_k).

Тут M_n – температура початку, а M_k – температура кінця мартенситного перетворення.

У перлітному інтервалі існують структури перліт, сорбіт і тростит, які різняться розмірами часточок фериту та цементиту. Чим нижча температура розпаду аустеніту, тим менша міжпластинчаста відстань Δ_0 (Δ_0 – сума товщини сусідніх пластинок фериту та цементиту), і більш дисперсна феритно-цементитна суміш (рис. 5.3).

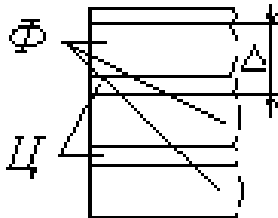


Рис. 5.3 – Схема будови феритно-цементитної суміші

Властивості продуктів перлітного перетворення (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Властивості продуктів перлітного перетворення

| Назва структури | Товщина пластинок Δ_0 , мкм | Твердість НВ |
|-----------------|------------------------------------|--------------|
| Перліт | 1,0–0,6 | 180–250 |
| Сорбіт | 0,25–0,3 | 250–350 |
| Тростит | 0,1–0,15 | 350–450 |

Перетворення аустеніту на бейніт. Для евтектоїдної сталі утворення бейніту відбувається у температурній області 550–240 °С. З аустеніту утворюється феритно-цементитна суміш, де ферит збагачений вуглецем до 0,2 %. Бейніт має голчасту будову та досить високу твердість НВ 450–500.

Перетворення аустеніту на мартенсит. Це перетворення відбувається при охолодженні аустеніту з критичною швидкістю ($V_{кр}$) до низьких температур (M_k). Критичною швидкістю називають *мінімальну швидкість охолодження, яка забезпечує перетворення аустеніту на мартенсит*.

Мартенсит – це пересичений твердий розчин вуглецю в Fe_α . Вміст вуглецю в мартенситі такий, як і в вихідному аустеніті, тому що мартенситне перетворення відбувається бездифузійним шляхом.

Температури початку (M_n) та кінця (M_k) мартенситного перетворення залежать від вмісту в сталі вуглецю та легуючих елементів. Мартенсит має високу твердість (до HB 700), яка залежить від вмісту в ньому вуглецю.

Перетворення аустеніту на мартенсит ніколи не йде до кінця. Тому завжди залишається певна кількість аустеніту (до 10 %), який називають **залишковим** ($A_{зал}$). Мартенсит має голчасту структуру.

Перетворення при нагріванні мартенситу (розпад мартенситу на феритно-цементитну суміш). Мартенсит є нерівноважною структурою, твердою але крихкою, зі значними внутрішніми напруженнями. При нагріванні з мартенситу виділяється вуглець і утворюються більш стійкі структури: це мартенсит відпуску (100–200 °С); тростит відпуску (300–400 °С) та сорбіт відпуску (500–620 °С).

Розпад мартенситу сприяє усуненню внутрішніх напружень, зменшенню твердості сталі, підвищенню ударної в'язкості та пластичності.

Технологія термічної обробки. Будь-який режим термічної обробки можна показати графічно в координатах «температура–час» (рис. 5.4).



Рис. 5.4 – Графік режиму термічної обробки (t_n – оптимальна температура нагрівання)

Швидкість охолодження визначається видом термічної обробки. Час нагрівання залежить від конструкції нагрівального пристрою та форми виробу. Орієнтовно його можна визначити за формулою:

$$\tau_n = 0,1D_1 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3,$$

де D_1 – мінімальний розмір максимального перерізу виробу (для пластин – це товщина); K_1 – коефіцієнт середовища (при нагрі-

ванні в середовищі повітря $K_1 = 2$, в розплаві солей – $K_1 = 1$, в розплаві металу – $K_1 = 0,5$; K_2 – коефіцієнт форми (для кулі – 1, циліндра – 2, паралелепіпеда – 2,5, пластини – 4); K_3 – коефіцієнт рівномірності нагрівання (всєбічний – 1, однобічний – 4).

Час витримки τ_v приймають рівним 1 хв для вуглецевих і 2 хв – для легованих сталей.

При термічній обробці вироби нагрівають в печах різних типів, які опалюються твердим, рідким чи газовим паливом, а також в електропечах. Вироби невеликих розмірів можна нагрівати в розплавах металів (свинцю) чи солей (KNO_3 , $NaNO_3$, $BaCl_2$).

При нагріванні рекомендовані такі норми часу: в електричних та полумєневих печах – 1 хв на 1 мм перерізу виробу, в соляних ваннах – 0,5 хв на 1 мм перерізу. Час нагрівання виробів з легованої сталі потрібно збільшити на 25–50 %.

При нагріванні в полумєневих чи електричних печах (рис. 5.5) поверхня металу, що нагрівається, реагує з атмосферою печі, що викликає окиснення та зневуглецювання сталі, зменшує твердість, міцність, зносостійкість. Для захисту виробів від окиснення в робочий простір печі вводять захисні атмосфери, які містять відновники – CO та H_2 . Витримка при температурі нагрівання обов'язкова для вирівнювання температури по всьому виробу та одержання однорідного дрібнозернистого аустеніту.



Рис. 5.5 – Зовнішній вигляд електричної печі для проведення термічної обробки

Основними видами термічної обробки є *відпал, нормалізація, гартування, відпуск* (рис. 5.6).

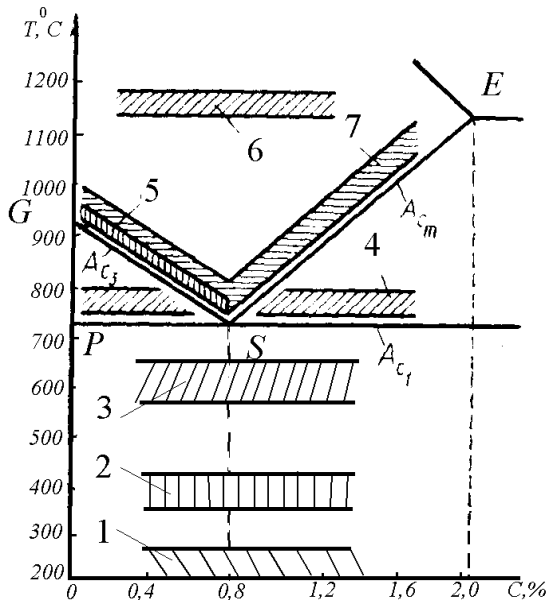


Рис. 5.6 – Положення критичних точок A_{C_1} , A_{C_3} , A_{C_m} на діаграмі Fe–Fe₃C

та температурні інтервали основних видів термообробки:

- 1 – низький відпал; 2 – середній відпал; 3 – високий відпал;
- 4 – відпал, гартування заевтектоїдних сталей;
- 5 – відпал, нормалізація, гартування доевтектоїдних сталей;
- 6 – дифузійний відпал; 7 – нормалізація заевтектоїдних сталей

Відпал – призначений для зниження твердості, міцності заготовок, підвищення пластичності, а також перекристалізації сталі. Для проведення відпалу доевтектоїдні сталі нагрівають вище точки A_{C_3} на 30–50 °С, заевтектоїдні – вище точки A_{C_1} на 30–50 °С, після витримки охолоджують з піччю. Після відпалу сталь буде мати рівноважну структуру – ферит з перлітом (доевтектоїдні), чи перліт з цементитом (заевтектоїдні).

Нормалізація – проводиться з метою перекристалізації зерна сталі, усунення внутрішніх напружень, підготовки сталі до подальшої пластичної деформації, механічної чи термічної обробки. Доевтектоїдні сталі для проведення нормалізації нагрівають вище точки A_{C_3} на 30–50 °С, а заевтектоїдні – вище A_{C_m} на 30–50 °С, витримують та охолоджують на повітрі. Після нормалізації твердість сталі вища, ніж після відпалу,

однак для низьковуглецевих сталей (0,1–0,3 % C) її часто проводять замість відпалу. Нормалізацію заевтектоїдних сталей проводять для усунення сітки цементиту по границях перлітних зерен, що покращує оброблюваність різанням.

Гартування – термічна обробка, яка проводиться нагріванням доевтектоїдних сталей вище точки A_{C_3} на 30–50 °С, заевтектоїдних вище A_{C_1} на 30–50 °С, витримки при цій температурі та охолодження з критичною швидкістю. Після гартування у воді структура сталі – мартенсит, який забезпечує високу твердість та міцність сталі. Гартуванню піддаються готові деталі та інструменти. Маловуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0,3 % не гартуються.

Охолоджуючими середовищами для гартування є вода, водні розчини солей (10–15 % розчин NaCl), лугів (10–15 % розчин NaOH) та масло. Після гартування в маслі сталь має структуру мартенсит і тростит. Вода охолоджує з швидкістю 600 °С/с, масло – 100 °С/с.

Воду використовують для гартування вуглецевих сталей з вмістом вуглецю більше 0,3 %. Сталі з меншим вмістом вуглецю мають дуже високу критичну швидкість охолодження, яку вода не забезпечує, тому аустеніт тільки частково перетворюється на мартенсит, значного підвищення твердості не досягають.

Високовуглецеві сталі та леговані охолоджують при гартуванні в маслі. Структура сталі після гартування мартенсит та цементит.

Загартовані на мартенсит сталі мають високу твердість, низьку пластичність, високий рівень внутрішніх напружень та високу крихкість. Такі сталі мало придатні для використання, тому загартовані сталі обов'язково піддають відпуску. Під час відпуску з мартенситу виділяється вуглець, усувається пересичення.

Розрізняють три види відпуску:

– **низький** проводять при температурі 150–200 °С. В процесі низького відпуску формується структура мартенситу відпуску. Твердість сталі знижується на 2–4 HRC, усуваються внутрішні напруження, підвищується в'язкість.

– **середній відпуск** проводять при температурі 350–500 °С. Після середнього відпуску утворюється структура троститу відпуску, з твердістю 40–50 HRC, вона має підвищену міцність та пружність.

– **високий відпуск** проводять при температурах 550–650 °С. Утворюється структура сорбіту відпуску з твердістю 25–30 HRC, значно підвищується в'язкість, пластичність, знімаються внутрішні напруження.

Тривалість витримки в процесі відпуску залежить від температури та розміру деталей і може складати 1–2,5 години. Охолодження проводять переважно на повітрі.

Мікроструктура сталі після термічної обробки (рис. 5.7–5.9).

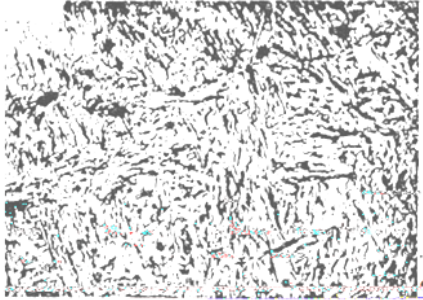


Рис. 5.7 – Структура доевтектоїдної сталі після гартування у воді (мартенсит). Мартенсит має голчасту будову з розміщенням голок під кутом 60, 90, 120. Їх розмір визначається розміром вихідного зерна аустеніту

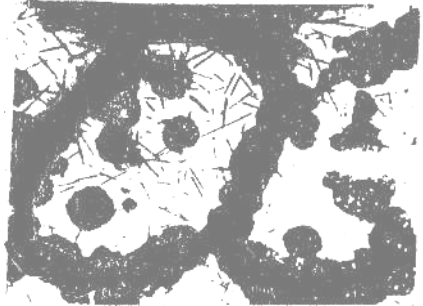


Рис. 5.8 – Структура доевтектоїдної сталі після гартування в маслі (мартенсит і тростит). Темні ділянки на границях зерен – тростит гартування, світлі ділянки – мартенсит

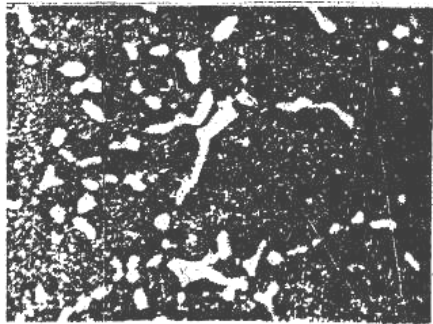


Рис. 5.9 – Структура заевтектоїдної сталі після гартування у воді (цементит у вигляді сітки на границях ділянок мартенситу)

Прогартовуваність та загартовуваність сталі. Для раціонального використання сталей необхідно знати такі важливі технологічні характеристики як загартовуваність та прогартовуваність.

Загартовуваність – це здатність сталі набувати високої твердості під час гартування, вона залежить від вмісту вуглецю в сталі і вимірюється в одиницях твердості.

Прогартовуваність – це глибина проникнення загартованої зони. Прогартовуваність суттєво впливає на службові властивості, довговічність та надійність машин, вимірюється в одиницях довжини (мм) і залежить від критичної швидкості гартування.

Швидкість охолодження при гартуванні розподіляється нерівномірно по перерізу виробу. Охолодження поверхневого шару і серцевини з швидкістю більшою чи рівною критичній сприяє формуванню структури мартенситу по всьому перерізу і деталь буде мати наскрізну прогартовуваність.

Якщо швидкість охолодження серцевини менша за критичну, прогартовуваність буде неповною і в серцевині утворюється тростит, сорбіт або зберігається вихідна структура.

Величина прогартовуваності суттєво впливає на властивості сталі. При наскрізній прогартовуваності властивості по перерізу загартованої сталі однорідні. Якщо прогартовуваність не наскрізна властивості сталі змінюються від поверхні до центра. Показники умовної межі текучості і ударної в'язкості будуть меншими, ніж на поверхні.

Загартовуваність сталі, в першу чергу, залежить від вмісту вуглецю в сталі і менше – від інших факторів.

Прогартовуваність залежить від багатьох факторів, особливо тих, що сприяють збільшенню стійкості аустеніту і зменшують критичну швидкість охолодження.

На величину прогартовуваності впливають такі фактори:

1. **Хімічний склад сталі.** При збільшенні вмісту вуглецю до 0,8 % прогартовуваність сталі збільшується. Всі легуючі елементи (за виключенням кобальту), які розчиняються в аустеніті, збільшують прогартовуваність так, як уповільнюють перетворення аустеніту в перліт.

2. **Однорідність структури.** Нерозчинені часточки карбідів, оксидів, інтерметалічних сполук прискорюють перетворення аустеніту на перліт, так як стають додатковими центрами кристалізації, тому сприяють зменшенню прогартовуваності.

3. **Розмір зерна аустеніту.** Збільшення розміру зерна аустеніту уповільнює перетворення аустеніту на перліт і тому збільшує прогартовуваність.

4. **Температура нагрівання.** При підвищенні температури нагрівання зерно росте, структура стає більш однорідною, що призводить до збільшення прогартовуваності.

5. **Розмір деталі.** Глибина загартованої зони збільшується при зменшенні відношення довжини деталі до її діаметра. На практиці для оцінки прогартовуваності використовують величину, яку називають **критичним діаметром** ($D_{кр}$) – максимальний діаметр деталі, яка прогартовується наскрізь у цьому охолоджувачі.

Для одержання оптимальних механічних властивостей в загартованому та відпущеному стані для деталей відповідального призначення, що працюють на розтяг загартована зона ($D_{кр}$) має дорівнювати радіуса деталі ($R_{дет}$), для деталей відповідального призначення, що працюють на кручення та згин – $D_{кр} = 0,5 R_{дет}$, у деталей невідповідального призначення $D_{кр} = 0,25R_{дет}$.

5.2. Хіміко-термічна обробка сталі

Хіміко-термічна обробка (ХТО) є одним з ефективних способів поверхневого зміцнення деталей машин та інструментів. Вона полягає в насиченні поверхневого шару сталі заданим елементом (або декількома). Найбільш поширеними видами ХТО є цементація, азотування, ціанування.

Фізичною основою хіміко-термічної обробки є дифузія насичуючого елемента в атомарному стані в поверхневі шари виробу із зовнішнього середовища.

Дифузія можлива завдяки тому, що атоми твердих тіл покидають свої місця і переходять в інші, а на їх місце можуть потрапити атоми дифундуючого елемента. Оскільки дифузія зумовлена тепловим рухом атомів, то прискорення цього процесу відбувається при підвищенні температури.

Законами дифузії є закони Фіка.

Перший закон Фіка має вигляд:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} ds d\tau.$$

Його формулювання – при постійній температурі кількість дифундуючої речовини dm в одиницю часу $d\tau$, через одиницю поверхні ds пропорційна градієнту концентрації dc/dx та коефіцієнту дифузії D ($\text{см}^2/\text{с}$).

Коли градієнт концентрацій змінюється у часі, а коефіцієнт дифузії приймають незалежним від концентрації, то процес дифузії описують другим законом Фіка, який виводиться з першого:

$$\frac{dc}{d\tau} = D \frac{d^2c}{dx^2}.$$

Коефіцієнт дифузії D (см²/с) визначає швидкість дифузії при перепаді концентрацій, що дорівнює одиниці. Він залежить від складу сплаву, розмірів зерен та температури процесу.

Коефіцієнт дифузії визначається за формулою:

$$D = A e^{\frac{-Q}{RT}},$$

де A – коефіцієнт, який залежить від типу кристалічної решітки; Q – енергія активації; e – основа натуральних логарифмів; R – газова постійна; T – абсолютна температура.

Закони дифузії широко використовуються не тільки при хіміко-термічній обробці, а також при дифузійній металізації, при виготовленні деталей методом порошкової металургії, дифузійному зварюванні, у вимірювальній техніці.

5.3. Види хіміко-термічної обробка сталі

Цементация – процес насичення поверхневого шару сталі вуглецем. Цементации піддають деталі, які повинні мати високу твердість, зносостійкість поверхні та в'язку серцевину. Цементують зубчасті колеса, пальці, черв'яки, валики. Ці деталі виготовляють з низьковуглецевих сталей, які містять до 0,3 % вуглецю (сталь 10, 20, 20X, 20XP, 15XF, 12XНЗА, 18ХГТ).

Поверхневий шар насичують вуглецем (до 0,8–1,0 % С). Глибина насичення 0,5–2,5 мм. Кількість вуглецю змінюється від поверхні вглиб до вихідного значення. Структура сталі відповідно змінюється від (П + Ц_П) на поверхні до П та (П + Ф) вглиб деталі. Кількість фериту зростає при наближенні до центра (рис. 5.10).

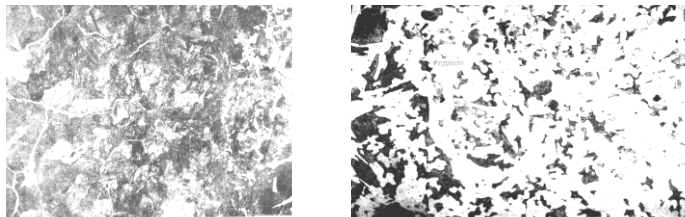
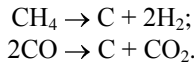


Рис. 5.10 – Структура цементованого шару сталі 20 (після цементации та повільного охолодження)

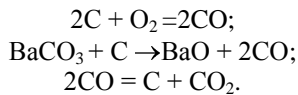
Враховуючи, що аустеніт максимально розчиняє до 2,14 % С, а ферит тільки до 0,025 % С, цементацию проводять при температурах, вищих A_{C_3} – від 930 °С до 950 °С.

Насичуючим середовищем при цементації може бути твердий, газоподібний чи рідкий карбюризатор (носії вуглецю). Газоподібний карбюризатор містить 92–96 % метану (CH₄) та деяку кількість окису вуглецю (CO).

При газовій цементації відбуваються наступні реакції:



Твердий карбюризатор – це деревне вугілля з додатком вуглекислих солей барію або натрію (75–85 % березового вугілля, 20–30 % BaCO₃ або Na₂CO₃). У процесі цементації проходять такі реакції:



Атоми вуглецю, що утворилися в результаті цих реакцій, потрапляють у кристалічну ґратку γ -заліза і завдяки дифузії проникають на певну глибину поверхневих шарів деталей.

Рідкий карбюризатор – це розплави солей (75–80 % Na₂CO₃, 15 % NaCl та 6–10 % SiC).

При газовій цементації можна досягти утворення навуглецьованого шару завтовшки 0,5–1,0 мм за 6–8 годин; при використанні рідкого карбюризатора цементований шар глибиною 0,1–0,2 мм утворюється за 30–40 хв.

Після цементації, вироби піддають гартуванню та низькому відпуску. На поверхні формується структура мартенситу відпуску з твердістю HRC 60–62, а в серцевині – сорбіт з твердістю HRC 26–28.

Після цементації та повільного охолодження на поверхні формується структура перліту з тонкою сіткою цементиту, яка зникає при віддаленні до серцевини. Мікроструктура перехідної зони – ферит та перліт; кількість перліту в структурі поступово зменшується, а фериту – збільшується. Серцевина має феритно-перлітну структуру з невеликою кількістю перліту і відповідає вихідній структурі низьковуглецевої сталі 20, яку піддавали цементації. Для подрібнення зерна, забезпечення необхідної твердості та зносостійкості поверхнього шару, цементовану сталь піддають гартуванню та низькому відпуску.

Азотування – процес дифузійного насичення поверхні деталей азотом. Азотуванню піддають деталі після проведеної термічної обробки (гартування та високого відпуску) з метою підвищення їх твердості, зносостійкості та корозійної стійкості. Це такі деталі, як гільзи, штоки клапанів, шийки колінчастих валів, копіри. Твердість сталі після азотування 1000–1200 HV. Після азотування на поверхні утворюється

шар глибиною 0,4–0,6 мм, який містить значну кількість нітридів, що забезпечують високу твердість (рис. 5.11).

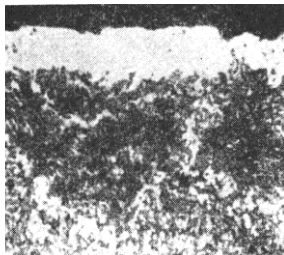


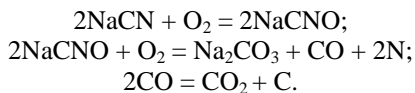
Рис. 5.11 – Структура азотованого шару (після повільного охолодження)

Азотування проводять для деталей зі сталей 38ХМЮА, 38Х2МЮА, 45 в печах у середовищі аміаку за температури 500–520 °С. При цьому внаслідок дисоціації аміаку утворюється атомарний азот, який адсорбується поверхнею деталі і дифундує вглиб: $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}$. Атомарний азот утворює нітриди заліза, хрому, марганцю, титану – Fe_4N , Fe_3N , CrN , Cr_2N , MnN , TiN .

Швидкість дифузії азоту в залізо дуже мала, тому витримка при азотуванні досить велика 24–80 годин. Якщо азотування проводять з метою підвищення корозійної стійкості, то температуру підвищують до 600–700 °С, тривалість процесу зменшується до 0,5–8 годин.

Ціанування – процес одночасного дифузійного насичення поверхні сталі вуглецем (до 0,7 %) та азотом (до 1,2 %). Його поділяють на середньотемпературне (820–860 °С) та високотемпературне (900–950 °С) і проводять в розплавах ціаністих солей. Тривалість витримки залежить від потрібної товщини насиченого шару і складає 30–90 хв для середньотемпературного ціанування та 1,5–6 годин – для високотемпературного.

У першому випадку поверхня насичується переважно азотом, в другому – вуглецем. Після ціанування проводять гартування та низький відпуск. Ціанування проводять з метою підвищення міцності, зносостійкості дрібних деталей, які працюють з невеликими питомими навантаженнями. Насичуючим середовищем є розплави солей, які містять групу $\text{CN}=\text{NaCN}$ та інші компоненти для здійснення реакцій (NaCl , Na_2CO_3).



Глибина насиченого шару 0,15–0,35 мм. Твердість після термічної обробки – HRC 58–62.

Низькотемпературне ціанування рекомендоване для підвищення стійкості інструменту з швидкорізальної сталі. Його проводять в рідкому чи твердому середовищі при температурі 540–570 °С. Термічну обробку інструменту проводять до ціанування. Товщина ціанованого шару 0,02–0,07 мм досягається за 15–30 хв. На поверхні утворюються нітриди, карбіди, які підвищують твердість сталі до 1000–1100 HV та її теплостійкість. Істотним недоліком ціанування у рідких середовищах є велика отруйність ціанистих солей.

Дифузійна металізація – це процес насичення поверхні сталі різними елементами. Розрізняють хромування (насичення хромом), алітування (алюмінієм), силіціювання (кремнієм). Вироби, поверхня яких насичена цими елементами, набувають високої жаростійкості, корозійної стійкості, підвищеної зносостійкості та твердості. Основними способами дифузійного насичення металами є:

- занурення в розплавлений метал (Al, Zn);
- насичення з розплавлених солей, які містять дифундуючий елемент;
- насичення з сублімованої фази шляхом випаровування дифундуючого елемента;
- насичення з газової фази, яка складається з галогенних сполук дифундуючого елемента.

Дифузійне хромування проводять у порошок ферохрому з потовченим шамотом, змоченим соляною кислотою або у газовому середовищі, що складається з хлоридів хрому при температурі 1000–1200 °С. На поверхні формується шар збагачений хромом у якому утворюються спеціальні карбіди хрому (Cr, Fe)₇C₃, (Cr, Fe)₂₃C₆. Карбідний шар має високу твердість – 1200–1300 HV.

Дифузійне алітування проводять у порошковій суміші (49 % фероалюмінію, 49 % оксиду алюмінію, 2 % нашатирю NH₄Cl) при температурі 950–1000 °С протягом 4–16 годин. Сталь набуває підвищеної корозійної стійкості внаслідок утворення на поверхні плівки Al₂O₃.

Силіціювання проводять для підвищення стійкості виробів у морській воді, кислотах. Використовують для цього суміші порошоків (70 % феросиліцію, 20 % шамоту, 5 % HCl), або газ (SiCl₂). Температура процесу 950–1000 °С. Кремній утворює з залізом твердий розчин. Твердість насиченого шару 200–300 HV.

Борування – насичення поверхні деталей бором для підвищення твердості, стійкості до зносу в абразивних середовищах, корозіє-, кислото-, жаро- і теплостійкості. Боруванню піддають деталі, які вимагають високої твердості. Твердість насиченого шару становить 1800–2000 HV, а товщина – до 0,3 мм. Застосовують тверді, рідкі, електролізні та газові способи борування. Електролізне борування виконують при темпера-

турах 900–950 °С у тиглі з розплавленою бурою $\text{Ca}_2\text{V}_4\text{O}_6$, куди завантажують деталі, що є катодом, графітовий стрижень – анодом. Процес супроводжується утворенням атомарного бору, який адсорбується поверхнею деталі та дифундує в глибину. Газове борування проводять в суміші диборану B_2H_6 та водню при температурі 850–900 °С.

Контрольні питання

1. Що таке термічна обробка? Основні перетворення, що відбуваються при термічній обробці сталі.
2. Пояснити діаграму ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту.
3. Особливості мартенситного перетворення.
4. Перетворення при нагріванні мартенситу.
5. З якою метою та за якими режимами проводять відпал, нормалізацію та гартування доевтектоїдних та заевтектоїдних сталей?
6. З якою метою проводять відпуск сталі? Види відпуску та їх режими? Як впливає температура відпуску на твердість та в'язкість сталі?
7. Які охолоджуючі середовища використовують для гартування?
8. Які властивості набуває сталь після відпалу, нормалізації та гартування?
9. Який режим термічної обробки забезпечує найкращу оброблюваність різанням?
10. Який режим термічної обробки сталі забезпечить високу зносостійкість?
11. Яка тривалість цементації в газовому середовищі?
12. У яких середовищах проводять нітроцементацію сталі?
13. Вкажіть оптимальний вміст вуглецю в цементованому шарі?
14. У яких середовищах проводять ціанування?
15. Яку твердість поверхні мають цементовані сталі?
16. Які властивості сталі підвищує азотування?
17. Яку термічну обробку проводять після цементації?
18. Чим збагачується поверхневий шар при алітуванні?

Тестові завдання

Виберіть правильну відповідь

1. Які перетворення відбуваються при охолодженні сталі У8 з аустенітного стану?

- | | |
|-----------------|------------------------------------|
| а) перлітне; | г) виділення надлишкової фази; |
| б) евтектичне; | д) розчинення вуглецю в аустеніті. |
| в) евтектоїдне; | |

2. Яка фаза є вихідною для одержання мартенситу?

- а) ферит; б) перліт; в) бейніт; г) аустеніт; д) цементит.

3. Які фази утворюються внаслідок перлітного перетворення вуглецевої сталі?

- а) аустеніт, мартенсит; г) ферит, цементит;
б) бейніт, перліт; д) ферит, аустеніт.
в) сорбіт, тростит;

4. Який температурний інтервал перлітного перетворення вуглецевої сталі?

- а) $A_3 - A_1$; в) $M_n - M_k$; д) $550^\circ\text{C} - M_k$.
б) $A_1 - 550^\circ\text{C}$; г) $550^\circ\text{C} - M_n$;

5. У сталях з яким вмістом вуглецю мартенситне перетворення закінчується при охолодженні до кімнатної температури?

- а) 0,8 % C; в) 0,6–1,0 % C; д) до 2,14 % C.
б) 0,4–0,6 % C; г) до 0,3 % C;

6. Від яких факторів залежить температурний інтервал мартенситного перетворення?

- а) виду охолоджуючого середовища; г) швидкості охолодження;
б) хімічного складу сталі; д) температури нагрівання
в) розмірів виробу, перед гартуванням.

7. Як впливає збільшення зерна аустеніту на ударну в'язкість сталі?

- а) збільшує в'язкість;
б) зменшує крихкість;
в) збільшує в'язкість тільки в легованих сталях;
г) зменшує в'язкість тільки в вуглецевих сталях;
д) не впливає.

8. Де з'являються зародки аустеніту при перетворенні $P \rightarrow A$ при повільному нагріванні?

- а) на границях зерен фериту;
б) на границях фериту та цементиту;
в) біля дислокацій;
г) на границях та на поверхні цементитних пластинок;
д) на поверхні зерен фериту.

9. Що таке критична швидкість охолодження?

- а) максимальна швидкість, з якою можна охолоджувати цю деталь;
б) мінімальна швидкість охолодження, яка забезпечує перетворення аустеніту на мартенсит;

- в) максимальна швидкість охолодження, яке забезпечує перетворення аустеніту на мартенсит;
- г) швидкість охолодження, яка не призводить до появи тріщин при охолодженні;
- д) охолоджуюча здатність води.

10. Чим відрізняються перліт, сорбіт, тростит?

- а) кількістю фериту;
- б) розміром пластин фериту та цементиту;
- в) формою кристалів фериту та цементиту;
- г) вмістом вуглецю у фериті;
- д) вмістом вуглецю у цементиті.

11. Загартовуваність сталі залежить від:

- а) швидкості охолодження;
- б) кількості вуглецю в аустеніті;
- в) розміру зерен фериту та перліту;
- г) розміру мартенситних голок;
- д) температури нагрівання.

12. Які фактори підвищують прогартовуваність сталі?

- а) підвищення вмісту вуглецю в сталі;
- б) збільшення швидкості охолодження;
- в) збільшення розмірів деталі;
- г) легуючі елементи;
- д) наявність карбідів.

13. Якою обробкою можна усунути перегрів сталі?

- а) неповним відпалом;
- б) гартуванням;
- в) невіправний брак;
- г) нормалізацією;
- д) високим відпуском.

14. Яку структуру має сталь 45 при нагріванні до 850 °С?

- а) перліт + ферит;
- б) ферит + аустеніт;
- в) аустеніт;
- г) ферит + цементит;
- д) аустеніт + цементит вторинний.

15. Які характеристики сталі найбільш суттєво залежать від величини зерна?

- а) НВ, НV;
- б) σ_{∞} , σ_m ;
- в) KCU, KCV;
- г) ψ , δ ;
- д) σ_{-1} , $\sigma_{0.2}$.

16. Якою обробкою можна усунути перепал?

- а) неповним гартуванням;
- б) гартуванням з високим відпуском;
- в) ніякою, – це невіправний брак;
- г) нормалізацією;
- д) повним відпалом.

17. Яке перетворення відбуваються при охолодженні сталі У8 з аустенітного стану до кімнатної температури?

- а) перлітне;
- б) евтектичне;
- в) евтектоїдне;
- г) виділення надлишкової фази;
- д) розчинення вуглецю в аустеніті.

18. Яка структура утворюється після високого відпуску загартованої вуглецевої сталі У8?

- а) тростит;
- б) мартенсит відпуску;
- в) сорбіт відпуску;
- г) мартенсит відпуску + цементит;
- д) перліт.

19. Для якої термічної обробки сталі нагрівають вище точки A_{cm} на 30–50 °С?

- а) відпалу доевтектоїдних сталей;
- б) нормалізації заевтектоїдних сталей;
- в) гартування евтектоїдних сталей;
- г) високого відпуску;
- д) низького відпуску.

20. Яку термічну обробку потрібно провести, щоб сталь мала високу пластичність та низьку твердість?

- а) гартування та відпуску;
- б) повий відпал;
- в) нормалізацію;
- г) дифузійний відпал;
- д) високий відпуск.

21. З яких основних перетворень складається технологічний процес гартування + високий відпуск?

- а) аустеніт→мартенсит, мартенсит→тростит;
- б) перліт→аустеніт, аустеніт→мартенсит, мартенсит→сорбіт;
- в) перліт→аустеніт;
- г) аустеніт→сорбіт;
- д) перліт→мартенсит→тростит.

22. Як охолоджують деталі із сталі 45 після відпуску?

- а) разом з піччю;
- б) на повітрі;
- в) у воді;
- г) в маслі;
- д) у розплавах солей.

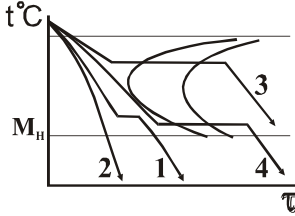
23. Які гартівні середовища використовують для гартування деталей з вуглецевих сталей?

- а) розплави солей, лугів, воду;
- б) масло, повітря, воду;
- в) воду, розчини солей та лугів;
- г) скраплений газ;
- д) масло.

24. Визначити етапи нагрівання термічної обробки:

- а) до оптимальної температури, витримка і охолодження з критичною швидкістю;
- б) до оптимальної температури, охолодження з швидкістю, що перевищує критичну;
- в) до температури точки A_{C_3} , витримка та охолодження – у воді;
- г) до оптимальної температури, витримка і охолодження з заданою швидкістю;
- д) вище A_{C_3} , витримка і охолодження з критичною швидкістю.

25. Який з режимів охолодження відповідає ступеневому гартуванню?

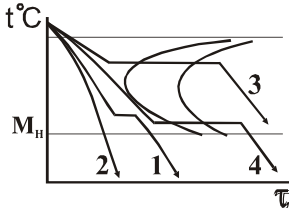


- а) крива 1;
- б) крива 2;
- в) крива 3;
- г) крива 4;
- д) не наведена.

26. Яку структуру буде мати сталь У12, якщо її загартувати від температури 600 °С?

- а) мартенсит + цементит_{II} + аустеніт залишковий;
- б) сорбіт;
- в) перліт + цементит_{II};
- г) мартенсит + цементит_{II};
- д) аустеніт.

27. Який режим охолодження відповідає ізотермічному гартуванню?



- а) крива 1;
- б) крива 2;
- в) крива 3;
- г) крива 4;
- д) не наведена.

28. З якою метою поковки нагрівають вище точки A_{C_3} на 30–50 °С, витримують і охолоджують з піччю?

- а) зниження твердості, міцності, усунення напружень;

- б) формування дрібнозернистої структури;
- в) підвищення в'язкості сталі;
- г) зміцнення сталі;
- д) одержання структури сорбіту.

29. Чому заевтектоїдні сталі після повного гартування мають меншу твердість, ніж після неповного?

- а) збільшується кількість залишкового аустеніту;
- б) зменшуються внутрішні напруження;
- в) зменшується температура мартенситного перетворення;
- г) мартенситне перетворення не відбувається до кінця;
- д) зменшується кількість вуглецю в мартенситі.

30. Яку структуру буде мати сталь 60 після середнього відпуску?

- а) перліт + ферит;
- б) сорбіт відпуск;
- в) тростит відпуску;
- г) перліт + цементит;
- д) мартенсит відпуску.

31. За яких температур відбувається розпад залишкового аустеніту вуглецевої сталі?

- а) 150–200 °С;
- б) 250–300 °С;
- в) 350–400 °С;
- г) 450–600 °С;
- д) 727 °С.

32. Яку структуру буде мати сталь 65 після обробки за таким режимом: нагрівання до 810 °С, охолодження у воді; нагрівання до 400 °С, охолодження на повітрі?

- а) мартенсит + ферит;
- б) сорбіт відпуску;
- в) тростит + мартенсит;
- г) тростит відпуску;
- д) ферит + перліт.

33. Яка структура утворюється після високого відпуску загартованої вуглецевої сталі У8?

- а) тростит;
- б) мартенсит відпуску;
- в) сорбіт відпуску;
- г) бейніт;
- д) мартенсит відпуску + цементит.

34. Виберіть термічну обробку для отримання в сталі 45 твердості HRC 50:

- а) нормалізація;
- б) відпал;
- в) гартування та високий відпуск;
- г) гартування;
- д) гартування та низький відпуск.

35. Як охолоджують вуглецеві сталі при проведенні відпуску?

- а) разом з піччю;
- б) у воді;
- в) у воді;
- д) у розплавах солей.

б) на повітрі; г) у маслі;

36. За яких температур відбувається розпад залишкового аустеніту вуглецевої сталі?

- а) 150–200 °С; г) 450–500 °С;
б) 250–300 °С; д) 20 °С.
в) 350 – 400 °С;

37. Яку структуру має сталь 20 після цементації?

- а) (перліт + ферит) на поверхні і в серцевині;
б) (мартенсит + аустеніт залишковий) на поверхні і ферит з перлітом у серцевині;
в) мартенсит відпуску по всьому перерізу;
г) (перліт + цементит) на поверхні; (перліт + ферит) в серцевині;
д) сорбіт по всьому перерізу.

38. Яка температура газової цементації?

- а) 800–900 °С; г) 1100–1200 °С;
б) 930–950 °С; д) 727–1147 °С.
в) 750–850 °С;

39. Які сталі належать до цементованих?

- а) 40ХН, 35ХГСА, 40Х; г) 20Х, 15Г, 12ХН2МА;
б) 60С2, 65Г, 70С2ФА; д) У7, 5ХНМ, ШХ9.
в) 38ХМЮА, 45ХНМФА;

40. Які властивості сталі підвищує азотування?

- а) в'язкість; г) твердість;
б) межу втоми; д) межу пружності.
в) відносне видовження;

41. Який оптимальний вміст вуглецю в цементованому шарі?

- а) 0,8–1,0 %; б) 0,3–0,8 %; в) 0,1–0,3 %; г) 0,3–1,6 %; д) 0,4–0,5 %.

42. Яку термічну обробку проводять після азотування?

- а) гартування та середній відпуск; г) нормалізацію;
б) гартування та високий відпуск; д) гартування
в) не проводять ніякої термічної обробки; та низький відпуск.

43. Які процеси відбуваються під час хіміко-термічної обробки?

- а) дисоціація, дифузія, адсорбція;
б) дисоціація, дифузія;
в) розпад молекул насичуючої речовини з утворенням атомів дифузанта;

г) реакції відновлення та окиснення.

44. Яку термічну обробку проводять після цементації?

- а) повний відпал;
- б) гартування та високий відпуск;
- в) нормалізацію;
- г) гартування та низький відпуск;
- д) не проводять.

45. Яка температура азотування для одержання високої твердості?

- а) 900–950 °С;
- б) 500–50 °С;
- в) 700–800 °С;
- г) 950–1000 °С;
- д) 600–700 °С.

46. Яка глибина цементованого шару?

- а) 1,5–3 мм;
- б) 5–10 мм;
- в) 0,5–2,5 мм;
- г) 0,8–1,2 мм;
- д) до 0,5 мм.

47. З яким вмістом вуглецю сталь піддають цементації?

- а) до 0,3 % С;
- б) 0,3–0,8 % С;
- в) 0,6–1,4 % С;
- г) 0,4–0,6 % С;
- д) до 1 % С.

48. Яку із сталей доцільно піддавати азотуванню?

- а) У12;
- б) ХВГ;
- в) 38ХМЮА;
- г) 12Х18Н9Т;
- д) 09Г2С.

48. Яка тривалість цементації в газовому середовищі?

- а) 15 год;
- б) 6–8 год;
- в) 15–20 год;
- г) 20–48 год;
- д) 1–2 год.

49. Яка твердість поверхні деталей після цементації та наступної термічної обробки?

- а) 48–52 HRC;
- б) 64–67 HRC;
- в) 52–56 HRC;
- г) 58–26 HRC;
- д) 26–28 HRC.

50. Для яких виробів проводять низькотемпературне ціанування?

- а) вали, вісі, зубчасті колеса;
- б) різальний інструмент з швидкорізальних сталей;
- в) інструмент з високовуглецевих сталей;
- г) ресори, пружини;
- д) тонколистовий прокат.

51. Які головні зміни відбуваються в сталі під час хіміко-термічної обробки?

- а) зміна хімічного складу серцевини виробу;
- б) хімічний склад не змінюється, а змінюється тільки структура;
- в) змінюється хімічний склад та структура поверхневих шарів;
- г) змінюється хімічний склад поверхні і серцевини виробів;

д) змінюється структура серцевини.

Варіанти завдань самостійної роботи

1. Зразки сталі 45 мають твердість HB 170. Після проведеної термічної обробки твердість зросла до HB 520. Опишіть, який вид термічної обробки проведено, який його режим, яка утворилася структура. Які ще властивості, крім високої твердості, може мати ця сталь?

2. Заготовки із сталі 20 піддавали нормалізації перед обробкою різанням. Опишіть режим проведення цього виду термічної обробки, структуру, яка утворилася, властивості сталі.

3. Зразки із сталі 40 після проведеної термічної обробки мають різну твердість: одні – твердість HB 165, інші – HB 210. Поясніть причину цього. Опишіть види та режими термічної обробки, яким піддали зазначені зразки.

4. Сталь 60 після проведеної термічної обробки має структуру троститу відпуску. Опишіть режим термічної обробки, який забезпечив формування цієї структури.

5. Пружини із сталі 65 мають твердість HB 420. Опишіть вид та режим термічної обробки, яка забезпечила формування таких властивостей та структуру сталі. Які ще властивості, крім досить високої твердості, мають ці пружини?

6. Вироби із сталей 40 та У12 гартували від температур 750 °С та 850 °С. Опишіть структуру, що сформувалась після такої обробки. За діаграмою стану «залізо–цементит» виберіть оптимальний режим нагрівання кожної сталі для проведення гартування.

7. Використовуючи діаграму стану «залізо–цементит» та криву зміни твердості залежно від температури відпуску, призначте для сталі 40 режим термічної обробки для забезпечення твердості HB 400.

8. За допомогою діаграми стану «залізо–цементит» визначте температуру повного та неповного гартування сталі 45, опишіть структуру та властивості сталі після кожного виду термічної обробки.

9. Плашки із сталі У11А загартовані: перша – від температури 760 °С, друга – від температури 850 °С. Використовуючи діаграму стану «залізо–цементит», поясніть, яка з цих плашок загартована правильно та має більш високі різальні властивості. Поясніть, чому.

10. Різальний інструмент потрібно обробити на максимальну твердість. Для його виготовлення вибрана сталь У13А. Призначте режим термічної обробки, обґрунтуйте та опишіть його, а також структуру та властивості сталі після проведеної обробки.

11. Призначте вид термічної обробки заготовок із сталі 30 для одержання низької твердості та високої пластичності. Як він називається та як його провести?

12. Вуглецеві сталі 45 та У8 після гартування та відпуску мають структуру мартенсит відпуску і твердість: перша – HRC 45, друга – HRC 58. Використовуючи діаграму стану «залізо–цементит», визначте температуру нагрівання для гартування та відпуску для кожної сталі. Опишіть перетворення, що відбулися під час гартування та відпуску і поясніть, чому сталь У8 має більш високу твердість, ніж сталь 45.

13. Деталі машин із сталі 40 загартовані: одні – від температури 760 °С, інші – від температури 830 °С. Використовуючи діаграму стану «залізо–цементит», поясніть, які з деталей мають більш високу твердість та кращі експлуатаційні властивості і чому?

14. Як можна виправити грубозернисту структуру кованої сталі 30. Використовуючи діаграму стану «залізо–цементит», виберіть та обґрунтуйте режим термічної обробки для виправлення структури. Опишіть структуру.

15. Сталь 45 піддавали відпалу при температурі 830 °С і 1000 °С. Опишіть перетворення, які відбуваються при цьому, охарактеризуйте структуру. Дайте визначення процесу відпалу та запропонуйте оптимальний режим його проведення.

16. Після гартування вуглецевої сталі одержана структура ферит та мартенсит. Проведіть на діаграмі стану «залізо–цементит» лінію сплаву, яка відповідає заданій сталі (приблизно), вкажіть вибрану в цьому випадку температуру нагрівання. Опишіть перетворення, які відбувались в сталі при нагріванні та охолодженні. Як називається такий вид гартування?

17. Осі із сталі 40Х після проведеної обробки мають структуру мартенситу відпуску. Опишіть якому виду термічної обробки піддавали ці деталі. Опишіть режими та перетворення на всіх етапах обробки.

18. Вали із сталі 30ХГТ потрібно піддати термічній обробці для одержання структури сорбіту відпуску. Призначте вид та режим потрібної обробки. Опишіть перетворення, що відбуваються на всіх етапах термічної обробки.

19. У чому полягає негативний вплив цементитної сітки на властивості інструментальної сталі У10 та У12. Яка термічна обробка призначається для її усунення? За допомогою діаграми стану «залізо–цементит» обґрунтуйте вибраний режим термічної обробки.

20. Після гартування отримана твердість нижча, ніж має бути згідно з технічними умовами. Якими можуть бути причини цього явища? Що потрібно зробити для одержання необхідної твердості?

21. Заготовки із сталі 40 мають грубозернисту структуру. Використовуючи діаграму стану «залізо–цементит» призначте та обґрунтуйте режим термічної обробки для одержання дрібного зерна в сталі.

22. Порівняйте властивості сталі 45 після відпалу, нормалізації та гартування?

23. Поясніть, який режим термічної обробки сталі У10 забезпечує найкращу оброблюваність різанням.

24. Зразки сталі 20 були нагріті для проведення термічної обробки до 1200 °С, інші зразки – до 900 °С. Після охолодження виявлено значну різницю в розмірі зерна цих сталей. Поясніть причину.

25. Поясніть, чому мартенсит має високу твердість.

26. Призначте режим цементації і кінцевої обробки для виробів із сталі 15ХФ.

27. Опишіть повну (включаючи попередню обробку) технологію азотування виробу, виготовленого із сталі 38ХНМФА

Приклади виконання самостійних завдань

Завдання 1. Поясніть, для яких сталей доцільно проводити повне гартування, а для яких – неповне.

Відповідь. Гартування – це вид термічної обробки, який проводять з метою підвищення твердості, міцності, зносостійкості сталі. Гартування полягає у нагріванні сталі до температури вище критичних точок, витримці та подальшому охолодженні зі швидкістю більшою за критичну. Розрізняють повне та неповне гартування.

Повне гартування проводять для доєвтектоїдних сталей. Такі сталі нагрівають вище точки A_{C_3} на 30–50 °С для одержання структури аустеніту, яка при охолодженні з критичною швидкістю перетворюється на мартенсит. Отже, такі сталі мають після гартування структуру мартенситу. Таке гартування називають **повним**. Сталь має високу твердість та міцність.

Заєвтектоїдні сталі для проведення гартування нагрівають до температури вище точки A_{C_1} на 30–50 °С, утворюється структура аустеніту і цементиту. Охолодження з критичною швидкістю забезпечує формування структури мартенситу, цементиту та аустеніту залишкового. Таке гартування називають **неповним**. Сталь також має високу твердість та міцність. Повне гартування для заєвтектоїдних сталей проводити недоцільно, тому що при нагріванні вище точки A_{C_3} , цементит вторинний розчиняється в аустеніті, і після охолодження з критичною швидкістю формується структура грубоголочастого мартенситу

та аустеніту залишкового. Сталь з такою структурою має меншу твердість та більшу крихкість.

Завдання 2. Сталі 40 та 40X після гартування у воді мають однакову твердість, а після гартування в маслі – різну. Поясніть, чому.

Відповідь. Гартування – це зміцнювальна термообробка, яка полягає в нагріванні сталі до температури вище критичних точок, витримці та подальшому охолодженні зі швидкістю більшою за критичну. Мета гартування – підвищення твердості і міцності сталі за рахунок одержання мартенситної структури.

Для утворення чисто мартенситної структури необхідно забезпечити швидкість охолодження більшу за критичну. Критичну швидкість охолодження ($V_{кр}$) для вуглецевих сталей забезпечують такі охолоджуючі середовища, як вода, водні розчини лугів та солей, які мають високу охолоджуючу здатність (600 °C/с і більше), для легованих сталей – це масло.

Сталі 40 та 40X мають різні критичні швидкості охолодження внаслідок різної стійкості переохолодженого аустеніту цих сталей. Якщо подивитись на діаграми ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту сталей 40 та 40X, то можна побачити, що значення величини мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту для сталі 40 менше за 1 с, для сталі 40X – близько 6 с. Це дозволяє вирахувати $V_{кр}$ для цих сталей. Отже, для сталі 40 – це становить майже 500 °C/с, для сталі 40X – 90 °C/с. Охолодження у воді і для сталі 40 і для сталі 40X забезпечує критичну швидкість охолодження, так як вода охолоджує з швидкістю 600 °C/с. У цьому випадку після гартування сталі 40 та 40X будуть мати структуру мартенситу (практично з однаковим вмістом вуглецю), і тому їх твердість буде однаковою.

При охолодженні у маслі, яке має охолоджуючу здатність (100 °C/с), меншу ніж вода, критична швидкість охолодження забезпечується тільки для сталі 40X.

Отже, у сталі 40X після охолодження у маслі буде сформована структура мартенситу, а у сталі 40, яка в цьому випадку буде охолоджуватись з швидкістю меншою за критичну, сформується троститомартенситна структура, твердість сталі буде меншою.

Завдання 3. Поясніть за допомогою діаграми ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту, яка структура утворюється з аустеніту в сталі У12 при температурі перетворення 650 °C.

Відповідь. Сталь У12 є заевтектоїдною. Температура перетворення – 650 °C, отже воно відбувається в перлітній області. За С-подіб-

ною діаграмою для заевтектоїдної сталі при температурах, нижчих за 727 °С, розпаду аустеніту передуює виділення з аустеніту цементиту. Зародки цементиту утворюються по границях зерен аустеніту.

Після виділення цементиту відбувається розпад аустеніту на феритно-цементитну суміш – перліт. За цих умов процеси дифузії відбуваються досить активно: утворюються центри кристалізації фериту та цементиту і під час витримки ці центри ростуть. Із закінченням перетворення утворюється структура – перліт і цементит.

Завдання 4. Виберіть вид хіміко-термічної обробки для підвищення зносостійкості та контактної міцності поршневих пальців автомобіля із сталі 18ХГТ. Опишіть цей процес.

Відповідь. Поршневі пальці належать до групи деталей, від яких вимагають високої твердості та міцності поверхні та середньої міцності в серцевині. Забезпечення цих властивостей та підвищення зносостійкості і контактної міцності поршневих пальців автомобіля досягають цементацією з наступною термічною обробкою.

Під час цементації змінюється склад поверхневих шарів: насичення сталі вуглецем сприяє збільшенню вмісту вуглецю в поверхневому шарі до 0,9–1,0 %.

Процес цементації здійснюють при 930–960 °С. Така температура забезпечує формування структури аустеніту і досить високу дифузійну здатність вуглецю. Середовище, яке є джерелом вуглецю – це природний газ метан CH_4 . Метан розкладається на водень і вуглець в атомарному стані, який дифундує у поверхню деталі, розчиняючись в аустеніті. Витримка при заданій температурі сягає 6–8 годин. Вона має забезпечити вміст вуглецю в поверхневому шарі біля 1,0–1,2 %. Глибина цементованого шару – в межах 5–9 % від діаметра деталі. Охолодження після цементації на повітрі.

Насичення поверхні деталі вуглецем ще не забезпечує досягнення необхідних властивостей, тому після цементації поршневі пальці піддають термічній обробці: гартуванню і низькому відпуску. Для гартування їх нагрівають вище точки A_{C1} на 70–80 °С та охолоджують в маслі.

Низький відпуск проводять при температурі 160–180 °С, витримка – 1–2 години. Це сприяє зменшенню гартівних напружень без помітного зниження твердості. Проведена цементація та термічна обробка забезпечать підвищення зносостійкості та контактної міцності поршневих пальців автомобіля із сталі 18ХГТ.

Тема 6. Конструкційні матеріали

6.1. Теоретичні відомості

Леговані конструкційні сталі використовують для виготовлення деталей в машинобудуванні, приладобудуванні, автомобілебудуванні та для виготовлення важконавантажених металоконструкцій.

Основними легуючими елементами, що входять до складу таких сталей, є марганець, кремній, хром, та більш дорогі – нікель, молібден, вольфрам та ніобій.

Конструкційні сталі за призначенням поділяють на такі групи: будівельні, цементовані, покращувані, ресорно-пружинні, підшипникові, корозійностійкі.

Будівельні сталі містять до 0,22 % вуглецю і невелику кількість легуючих елементів – марганцю (до 1,8 %), кремнію (до 1,2 %), хрому (до 0,85 %), нікелю (до 0,8 %), ванадію (до 0,15 %), азоту (до 0,15 %), міді (до 0,5 %). Такі сталі добре зварюються, мають досить високі показники міцності та в'язкості. Марки сталей 09Г2С, 14Г2, 17ГС, 15ХФ, 10Г2СФ, 15ХСНД, 10Г2Б. Основне використання таких сталей – зварні конструкції, що піддаються впливу динамічних та вібраційних навантажень, ферми, рами, балки перекриттів, колони, стойки, опорні плити тощо.

Цементовані сталі – це низьковуглецеві сталі, які містять 0,15–0,25 % С та легуючі елементи в невеликій кількості і для забезпечення потрібної прогартовуваності (сталь 10, 20, 25, 15ХФ, 18ХГТ, 20ХР, 12ХН3А, 18Х2Н4МА. Такі сталі використовують для виготовлення зубчастих коліс, валів коробки передач авто, валів швидкохідних верстатів, шпинделів та інших деталей. Після цементації, гартування та низького відпуску цементований шар має твердість 58–62 HRC, а серцевина 28–42 HRC. Серцевина цементованих сталей повинна мати високі механічні властивості, підвищену межу текучості, високий опір крихкому руйнуванню та бути спадково дрібнозернистою. Для подрібнення зерна в сталі вводять мікродобавки V, Ti, Nb, Al, Zr, N, які утворюють дисперсні нітриди VN, TiN, ALN та карбонітриди V (N, C), Ti (N, C), Zr (N, C), або карбіди VC, TiC, які затримують ріст зерна аустеніту; а для підвищення в'язкості та прогартовуваності – нікель і молібден.

Типова обробка таких сталей – цементація та гартування з низьким відпуском.

Покращувані сталі. До цієї групи належать сталі середньовуглецеві з вмістом вуглецю від 0,3 до 0,5 % (35, 40, 45, 40Х, 40ХНМ, 30ХГСА, 50ХН, 38ХН3МФ), з яких виготовляють відповідальні деталі турбін, компресорних машин, автомобілів, верстатів. Такі деталі по-

винні мати високу межу текучості, малу чутливість до концентраторів напружень, високу межу витривалості так як так працюють за умов багаторазового прикладання навантажень. Термічна обробка цих сталей – гартування та високий відпуск (покращення), що і зумовило назву цих сталей. Температура нагрівання для гартування залежно від марки сталі – 820–880 °С, охолодження в маслі. Відпуск проводять при 500–600 °С, охолодження у воді чи маслі.

Ресорно-пружинні сталі. З цих сталей виготовляють пружини, пружні елементи та ресори різного призначення. Такі сталі повинні мати високий опір малим пластичним деформаціям, мати високу межу витривалості та релаксаційної стійкості, достатню пластичність та в'язкість. Тому вони містять більше 0,5 % С і піддаються термічній обробці: гартуванню від температур 840–880 °С та середньому відпуску при 420–480 °С. Твердість пружин 42–48 HRC. Після гартування структура мартенситу повинна бути по всьому об'єму.

Для пружин малого перерізу, які піддаються невеликим навантаженням використовують вуглецеві сталі 65, 70, 75, 85. Для більш відповідальних пружин використовують леговані сталі 55С2, 60С2А, 70С3А, 60С2ХФА, 60С2Н2А, 65С2ВА, 50ХГФА. Межа витривалості суттєво зменшується при наявності на поверхні ресорі пружин різних дефектів (забоїн, рисок, подряпин), які відіграють роль концентраторів напружень. Термін експлуатації ресор можна підвищити гідроабразивною чи дробоструминною обробкою (поверхневим пластичним деформуванням), що сприяє виникненню в поверхневих шарах залишкових напружень стискання, які знижують робочі напруження розтягу в зовнішніх волокнах.

Підшипникові сталі. Ці сталі спеціально розроблені для виготовлення підшипників кочення, які є відповідальними деталями багатьох машин: верстатів, автомобілів, тракторів, вагонів, електродвигунів тощо. Підшипники кочення працюють в умовах кочення кульок (чи роликів) по зовнішньому та внутрішньому кільцях. Найчастіше причиною виходу їх з ладу є злам, руйнування тіл кочення і робочих поверхонь кілець, а також крихкість від втоми робочих поверхонь елементів підшипника.

Для виготовлення тіл кочення і підшипникових кілець невеликих розмірів використовують високовуглецеві хромисті сталі ШХ4, ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ. Типова термічна обробка – гартування та низький відпуск для одержання твердості в межах 60–65 HRC.

Для виготовлення деталей підшипників кочення, які працюють при високих динамічних навантаженнях, використовують цементовані сталі 20Х2Н4А і 18ХГТ, які піддають цементації на товщину 0,9–1,8 мм, гартуванню і низькому відпуску.

Корозійностійкі та жаростійкі сталі. Сталі, які стійкі до газової корозії при високих температурах (більше 550 °С) називають **окалино-** або **жаростійкими**. Сталі, стійкі до електрохімічної, хімічної (атмосферної, ґрунтової, лужної, кислотної, сольової), міжкристалітної та інших видів корозії, називають **корозійностійкими** або **нержавіючими**. Підвищення стійкості сталі до корозії досягають введенням до її складу елементів, що утворюють на поверхні захисні плівки, які міцно з'єднані з основним металом. Ці плівки не допускають контакту між сталлю та агресивним середовищем. Елементи, що вводяться в сталь, повинні підвищувати її електрохімічний потенціал в агресивних середовищах.

Жаростійкі сталі стійкі проти газової корозії при високих температурах. До їх складу вводять хром, алюміній, кремній, які при нагріванні утворюють захисні плавки оксидів $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al, Fe)_2O_3$. Найпоширенішими жаростійкими сталями є сталі феритного 12X17, 15X25T та аустенітного класу 20X23H13, 12X25H16Г7AP, 36X18H25C2, мартенситного класу 40X9C2, 40X10C2T. З них виготовляють високотемпературні установки, деталі печей, газових турбін, клапани автомобільних та авіаційних двигунів.

Склад корозійностійких сталей розробляється залежно від умов їх роботи. Вони поділяються на дві групи: **хромисті** і **хромонікелеві**.

Хромисті сталі містять від 12 % хрому, що робить їх електрохімічний потенціал додатним і вони набувають антикорозійної стійкості. Сталі 12X13, 20X13, 30X13, 40X13 використовують для виготовлення клапанів гідравлічних пресів, предметів домашнього вжитку, карбюраторних голок, пружин, хірургічного інструменту. Їх піддають гартуванню від 1000–1100 °С і високому відпуску при 700–775 °С. Сталь 12X17 використовують для виготовлення обладнання заводів харчової і легкої промисловості та предметів побутового вжитку. Для цих виробів виконують рекристалізаційний відпал за температури 760–780 °С. Сталі 15X25T, 15X28 використовують без термообробки, для виготовлення зварних деталей, які працюють в агресивних середовищах і не піддаються дії ударних навантажень. Ці сталі схильні до міжкристалічної корозії, яка виникає через виділення хрому з твердого розчину і утворення карбідів хрому під час зварювання. Для підвищення опору міжкристалічній корозії і подрібнення зерна сталь легують титаном, титан зв'язує вуглець і усуває можливість утворення карбідів хрому, тобто хром залишається в фериті і його корозійна стійкість не погіршується.

Сталі аустенітного класу. Їх легують хромом, нікелем і марганцем. При кімнатній температурі сталі мають структуру аустеніту та достатньо міцні і пластичні, мають високу корозійну стійкість в окиснювальних середовищах. До таких сталей належать 12X18H9, 17X18H9, 12X18H10T, 10X14Г14H4T, 10X14AГ15, 10X17H13M2T, 09X15H8Ю.

5. Яка термічна обробка та твердість є оптимальними для ресор та пружин?

- а) гартування, твердість HRC 60;
- б) гартування та низький відпуск, твердість HRC 58–60;
- в) гартування та середній відпуск, твердість HRC 39–44;
- г) рекристалізаційний відпал, твердість HB 220;
- д) гартування та високий відпуск, твердість HRC 26–28.

6. До якої групи матеріалів належать хромисті сталі з вмістом хрому більше 12 %?

- а) жаростійкі сталі;
- в) нержавіючі сталі;
- д) конструкційні.
- б) інструментальні сталі;
- г) жароміцні сталі;

7. Які сталі (з наведених) можуть працювати в агресивних середовищах (розчинах кислот)?

- а) 20ХГР;
- б) 40ХНМА;
- в) 15Х28;
- г) 09Г2С;
- д) Ст 4 кп.

8. Яка термічна обробка є оптимальною для покращування сталей?

- а) середній відпуск;
- б) гартування та низький відпуск;
- в) нормалізація та низький відпуск;
- г) гартування та високий відпуск;
- д) відпал.

9. Які легуючі елементи вводять для покращення в'язкості цементованих сталей?

- а) хром;
- б) марганець;
- в) кремній;
- г) нікель;
- д) мідь.

10. До якої групи за призначенням належить сталь 10Х18Н10Т?

- а) високолегована;
- в) аустенітна;
- д) холодостійка.
- б) хромонікелева;
- г) корозійностійка;

11. З якої сталі виготовляють підшипники?

- а) 9ХС;
- б) 15Х25Т;
- в) ХВСГ;
- г) ШХ15;
- д) Х6ВФ.

12. Запишіть марку сталі, що містить вуглецю – 0,6 %, кремнію – 2 %, хрому – 1,2 %, ванадію – 0,2 %:

- а) 06СХФ;
- б) 60С2ХФ;
- в) 60С2ХФА;
- г) 6С2Х2Ф;
- д) сталь 60.

13. Виберіть сталь для виготовлення втулок?

- а) 15ХСНД;
- б) 18ХГТ;
- в) сталь 3;
- г) 12Х13;
- д) 40Х9С2.

14. Яка з наведених марок сталей належить до цементованих?

- а) 15Х17АГ14;
- б) 12Х17;
- в) 20Х2Н4А;
- г) 70С3А;
- д) 40Х.

15. Яку сталь доцільно використати для виготовлення корпусних деталей побутових приладів?

а) 20ГФЛ; б) 40Х13; в) 12Х1МФ; г) 08 кп; д) 40ХНМА.

16. Виберіть з наведених жаростійку сталь:

а) 12Х13; б) 40ХНМ; в) 12ХМФ; г) 12ХНМА; д) 15Х25.

17. Виберіть з наведених корозійностійку сталь аустенітного класу:

а) 13Х; б) 15Х1М1Ф; в) 40Х9С2; г) 10Х14Г14Н4Т; д) 08Х17.

18. Який основний елемент забезпечує жаростійкість сталі:

а) марганець; в) нікель; д) ванадій.

б) хром; г) вольфрам;

19. До якого структурного класу належить сталь 08Х17?

а) мартенситного; в) аустенітного; д) ледебуритного.

б) феритного; г) перлітного;

20. До якої групи за призначенням належить сталь, що містить до 1 % вуглецю та 0,9 % хрому?

а) цементованої; в) підшипникової; д) корозійностійкої.

б) покращувальної; г) ресорно-пружинної;

Варіанти завдань самостійної роботи

1. Призначте температуру гартування, охолоджуюче середовище та температуру відпуску деталей машин із сталі 40Х, які повинні мати твердість 28–35 HRC. Опишіть суть перетворень під час термічної обробки, мікроструктуру та властивості.

2. Після термічної обробки пружини повинні мати високу пружність. Для їх виготовлення вибрана сталь 50ХГФА. Запишіть склад сталі, призначте та обґрунтуйте режим термічної обробки. Опишіть суть перетворень під час термічної обробки, мікроструктуру та властивості готових пружин.

3. Призначте режим обробки шестерні із сталі 40ХГР з твердістю зуба, яка має дорівнювати 56–58 HRC, обґрунтуйте його. Опишіть мікроструктуру та властивості поверхні зуба та серцевини шестерні після термічної обробки.

4. Призначте температуру гартування, охолоджуюче середовище та температуру відпуску деталей із сталі 40ХГ, які повинні мати твердість 230–250 НВ, обґрунтуйте його. Опишіть мікроструктуру та властивості сталі після термічної обробки.

5. Для виготовлення деталей підшипників кочення вибрана сталь ШХ15СГ. Запишіть склад сталі, призначте режим термічної об-

робки, обґрунтуйте його. Опишіть мікроструктуру та властивості сталі після проведеної обробки.

6. Пружини із сталі 65Г після правильно проведеного гартування та наступного відпуску мають твердість нижчу, ніж вимагають технічні умови. Чим викликаний цей дефект і як його можна виправити? Запишіть, яка твердість та структура забезпечують експлуатаційні властивості пружинам.

7. Для виготовлення шпинделя токарного верстата вибрана сталь 40ХГР. Призначте та обґрунтуйте режим термічної обробки, який забезпечить твердість HRC 56–58. Опишіть мікроструктуру та властивості сталі після проведеної обробки.

8. Ресори автомобіля ГАЗ-52 виготовлені із сталі 50ХГ. Розшифруйте марку сплаву. Обґрунтуйте вибір сплаву. Опишіть режим термічної обробки, структуру та властивості.

9. Розподільні вали виготовляють з цементованої сталі 20ХН3А. Розшифруйте марку сталі. Виберіть та обґрунтуйте режим термічної та хіміко-термічної обробки для забезпечення експлуатаційних властивостей.

10. Колінчастий вал двигуна середньої потужності виготовлено із сталі 40Г. Розшифруйте марку сталі, призначте режим термічної обробки для одержання твердості HRC 28–30, обґрунтуйте його, опишіть структуру та властивості сталі після проведеної обробки.

11. Впускні клапани двигунів автомобілів виготовлені із сталі 40Х9С2М. Розшифруйте марку сталі. Виберіть та обґрунтуйте режим термічної обробки для забезпечення експлуатаційних властивостей.

12. Впускні клапани двигунів автомобілів виготовлені із сталі 40Х. Розшифруйте марку сталі. Виберіть та обґрунтуйте режим термічної обробки для забезпечення експлуатаційних властивостей.

13. Кулачки розподільного валу автомобіля виготовлені із сталі 20Х. Розшифруйте склад сталі. Призначте обробку, та її режим, яка забезпечить експлуатаційні властивості цим деталям, обґрунтуйте його.

14. Шатуни високонавантажених двигунів виготовляють із сталі 40Х2Н2МА. Розшифруйте склад сталі. Призначте термічну обробку, яка забезпечить їм достатню міцність, жорсткість, твердість в межах HB 260–280.

15. Поршневі пальці автотракторних двигунів виготовляють із сталі 12ХН3А. Розшифруйте склад сталі, призначте та обґрунтуйте термічну обробку, яка забезпечить твердість поверхні HRC 58–60, серцевини HRC 26–28.

16. Для підвищення надійності (опору крихкому руйнуванню) деталей замінили сталь 40 на 35ХЗНЗ. Деталі піддають гартуванню та високому відпуску (500 °С). Поясніть, чи досягнута мета.

17. Колінчасті вали двигунів виготовлено із сталі 40Г. Призначте та обґрунтуйте режим термічної обробки цих деталей для одержання твердості HRC 26–28, опишіть мікроструктуру та властивості сталі після проведеної обробки.

18. Кулачки повинні мати мінімальну деформацію та високу зносостійкість (твердість поверхні HV 750–1000). Для виготовлення їх вибрано сталь 38ХМЮА. Розшифруйте склад сталі та визначте до якої групи належить ця сталь за призначенням. Виберіть режим термічної та хіміко-термічної обробки, обґрунтуйте його, поясніть перетворення, що відбуваються при термічній обробці.

19. Для виготовлення деталей підшипників кочення (ролики, кульки) вибрано сталь ШХ15. Розшифруйте склад сталі та визначте до якої групи вона належить (за призначенням). Виберіть режим термічної обробки, обґрунтуйте його, поясніть перетворення, що відбуваються при термічній обробці.

20. Шестерні коробок швидкостей виготовлені із сталі 18ХГГ. Яку обробку потрібно провести, щоб шестерні на поверхні мали твердість HRC 60, а в серцевині – HRC 28.

21. Призначте температуру гартування, охолоджуюче середовище та температуру відпуску валів із сталі 40Х, які повинні мати твердість 28–35 HRC. опишіть суть перетворень під час термічної обробки, мікроструктуру та властивості.

22. Призначте температуру гартування, охолоджуюче середовище, температуру відпуску ресор із сталі 65Г, які повинні мати твердість 45–50 HRC. опишіть мікроструктуру та властивості сталі.

23. Пружини часових механізмів після термічної обробки повинні мати твердість HRC 40–45. Для їх виготовлення вибрана сталь 70С2ХА. Розшифруйте склад та визначте, до якої групи належить ця сталь за призначенням. Виберіть режим термічної обробки, обґрунтуйте його, опишіть мікроструктуру та властивості сталі після термічної обробки.

24. Болти відповідального призначення повинні мати твердість HRC 28–30. Для їх виготовлення вибрана сталь 40ХН. Розшифруйте склад та визначте, до якої групи належить ця сталь за призначенням. Виберіть режим термічної обробки, обґрунтуйте його, опишіть мікроструктуру та головні властивості сталі після термічної обробки.

25. Тонкостінні труби виготовлено із сталі 25ХГСА. Розшифруйте склад сталі, визначте групу сталі за призначенням. Виберіть режим термічної обробки, обґрунтуйте його. опишіть мікроструктуру та властивості сталі після термічної обробки.

26. Вали із сталі 15ХФ повинні мати твердий поверхневий шар. Виберіть та обґрунтуйте вид та режим хіміко-термічної обробки, опишіть його та структуру і властивості виробів після кінцевої термічної обробки.

27. Після термічної обробки ресори повинні мати високу пружність. Для їх виготовлення вибрана сталь 60С2ВФ. Запишіть склад сталі, призначте та обґрунтуйте режим термічної обробки, опишіть мікроструктуру та властивості ресор після термічної обробки.

28. Призначте жароміцну сталь (сільхром) для клапанів потужних тракторних двигунів: розшифруйте склад, визначте клас сталі за структурою; призначте та обґрунтуйте режим термічної обробки; опишіть мікроструктуру та властивості сталі після проведеної обробки.

Приклади виконання самостійних завдань

Завдання 1. У машинобудуванні використовується сталь ШХ9. Розшифруйте склад, визначте групу за призначенням. Виберіть режим термічної обробки, обґрунтуйте його. Опишіть структуру та властивості сталі після термічної обробки.

Відповідь. Сталь ШХ9 має такий хімічний склад: 0,9–1,0 % вуглецю, 0,9 % хрому. За призначенням сталь належить до шарикопідшипникових сталей. Сталь призначена для виготовлення таких деталей як підшипники кочення та зубчасті колеса. Втомна крихкість на робочих поверхнях спричиняють циклічні контактні напруження стискування. Вони створюють у поверхневому шарі напружений стан, який полегшує пластичну деформацію поверхневого шару, як наслідок, розвиток в ньому процесів втоми.

У зв'язку з цим висока контактна витривалість може бути забезпечена лише при високій твердості поверхні. Висока твердість потрібна також для підвищення зносостійкості контактуючих поверхонь в момент їх проковзування. Підшипники ковзання працюють, як правило, при низьких динамічних навантаженнях, що дозволяє виготовляти їх з доволі крихких високовуглецевих сталей, таких як сталь ШХ9, після наскрізного гартування та низького відпуску. Сталь ШХ9 призначена для виготовлення деталей підшипників поперечним перерізом до 20 мм.

Сталь постачають після сфероїдизації відпалом, який забезпечує структуру дрібнозернистого перліту з твердістю НВ 179–217. Відповідно до стандартів на сталь регламентується карбідна неоднорідність та забрудненість неметалевими включеннями, тому що при виході їх на робочу поверхню, вони є концентраторами напружень і сприяють більш швидкому розвитку утомної крихкості.

Для деталей підшипників рекомендована термічна обробка: гартування від температури 820–850 °С та низький відпуск при 150–170 °С. Гартування необхідне для надання високої твердості, міцності, зносостійкості. Структура сталі мартенсит, карбіди та залишковий аустеніт. Присутність залишкового аустеніту є небажаною, так як перетворення його в процесі експлуатації може призвести до зміни розмірів деталей

підшипників. Для усунення залишкового аустеніту і стабілізації розмірів прецизійних підшипників після гартування проводять обробку холодом при $-70-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після гартування та обробки холодом проводять низький відпуск. Після проведеної обробки підшипникова сталь має структуру мартенситу відпуску з включеннями дрібних карбідів та високу твердість HRC60–64.

Завдання 2. Вироби із сталі 40X потрібно піддати покращенню. Призначте режим термічної обробки, опишіть суть перетворень, структуру та властивості сталі.

Відповідь. Сталь 40X – конструкційна, середньовуглецева, низьколегована, містить 0,4 % вуглецю та 1 % хрому. Покращення – це вид термічної обробки, який складається з гартування та високого відпуску. Гартування сталі 40X проводять від температури $850-860\text{ }^{\circ}\text{C}$ з охолодженням в маслі. Відпуск призначаємо при температурі $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, охолодження в маслі.

Вибрана температура нагрівання для гартування $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ забезпечує формування структури аустеніту. При охолодженні в маслі утворюється структура мартенситу. Так як мартенситне перетворення відбувається бездифузійним шляхом то в ньому міститься стільки вуглецю скільки його було у вихідному аустеніті (0,4 % C). Отже, це сприяє збільшенню твердості після гартування до HRC 54–56. Така сталь тверда, але крихка. Для надання сталі необхідних експлуатаційних властивостей проводимо високий відпуск. Сталь нагрівають до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ і витримують 35–40 хв. Під час відпуску відбувається розпад мартенситу на феритно-цементитну суміш (з мартенситу виділяється надлишковий вуглець). Після обробки сталь набуває структури сорбіту відпуску. Твердість падає до HB 260–280. Така обробка забезпечить високу межу текучості, малу чутливість до концентраторів напружень, високу межу витривалості та достатній запас в'язкості.

Завдання 3. Виберіть сталь для виготовлення ресор. Призначте режим термічної обробки, опишіть мікроструктуру та властивості ресор в готовому стані. Яким способом можна підвищити їх міцність на втому?

Відповідь. Основними вимогами, які висувають до ресор і пружин, є висока межа пружності, високий опір втомі при достатній пластичності. Особливості роботи ресор полягають в тому, що при значних ударних чи статичних навантаженнях в них не допускаються залишкові деформації. У зв'язку з цим, сталь для ресор повинна мати високий опір малим пластичним деформаціям, які визначаються межею пружності, а також високою межею витривалості. Задовольняють таким вимогам сталі з підвищеним вмістом вуглецю до 0,5–0,8 %. Леговані сталі мають

більш високі експлуатаційні властивості так як вони мають більш високу релаксаційну стійкість, прогартовуваність та межу витривалості.

Релаксація напружень небезпечна тим, що внаслідок переходу частини пружної деформації в пластичну, пружні елементи (ресори, пружини), змінюють розміри і форму, що є небезпечним для з'єднань.

Легуючі елементи, такі як: хром, кремній, марганець підвищують релаксаційну стійкість, забезпечують більш тривалу та надійну роботу машин і приладів. Виходячи з цього, вибираємо для ресор леговану сталь марки 50ХФА. Ця сталь використовується для відповідальних ресор та пружин, тому що має досить високі пружні властивості.

Сталь 50ХФА має такий хімічний склад: 0,46–0,54 % С, 0,50–0,80 % Мп, 0,17–0,37 % Si, 0,8–1,1 % Cr, 0,1–0,20 % V. Літера А в кінці марки означає, що сталь високоякісна, тобто містить не більше 0,025 % шкідливих домішок – сірки та фосфору.

Сталь не схильна до росту зерна при термічній обробці, так як ванадій, утворюючи карбіди VC, стримує ріст зерна аустеніту. Сталь також не схильна до знеуглецювання при нагріванні, так як не містить кремнію. Ресори із сталі 50ХФА піддають гартуванню та середньому відпуску. Температура нагрівання для гартування 870 °С, охолодження в маслі. Прогартовуваність забезпечується по всьому перерізу. Температура відпуску 520 °С, витримка – 30–40 хв, охолодження на повітрі. Твердість сталі після проведеної обробки – НВ 390–480.

При нагріванні сталі до температури гартування феритно-перлітна структура перетворюється на аустеніт. Зерно залишається дрібним. Охолодження в маслі забезпечує критичну швидкість охолодження і тому аустеніт перетворюється на мартенсит. Це перетворення відбувається бездифузійним шляхом, тому в мартенситі набагато більше вуглецю ніж може вмістити решітка об'ємно-центрованого куба заліза (Fe_α). При кімнатній температурі Fe_α може розчинити всього 0,006 % вуглецю, а після гартування вміст вуглецю в Fe_α сягає 0,5 %. Таким чином, мартенсит є пересиченим твердим розчином вуглецю в Fe_α . Мартенсит має голчасту будову, високу твердість, міцність, занижену в'язкість. Загартована сталь має значні залишкові внутрішні напруження. Для їх зменшення, підвищення в'язкості сталі проводимо відпуск при 520 °С. При цій температурі відбувається розпад мартенситу на феритно-цементитну суміш, яку називають *троситом відпуску*. Твердість сталі після проведеної обробки НВ 390–480. Сталь з такою структурою має високу пружність та міцність і підвищену в'язкість.

Термін експлуатації ресор та пружин можна підвищити обробкою поверхні дробом. У поверхневому шарі формується нагартований шар товщиною 0,1–0,2 мм з залишковими стискаючими напруженнями. Після обробки дробом межа витривалості збільшується в 1,5–2 рази.

Література

Основна

1. Афтандіянц Є. Г. Матеріалознавство : підручник / Є. Г. Афтандіянц, О. В. Зазимко, К. Г. Лопатьмо. – Херсон : ОЛДІ-плюс; Київ : Ліра-К, 2013. – 612 с.
2. Інженерне матеріалознавство : підручник / О. М. Дубовий [та ін.]. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с.
3. Прикладне матеріалознавство : підручник / за ред. В. І. Большакова. – 2-ге вид. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро VAL», 2000. – 290 с.
4. Матеріалознавство : підручник / за ред. проф. С. С. Дяченко. – Харків : ХНАДУ, 2007. – 440 с.
5. Гарнець В. М. Матеріалознавство : підручник / В. М. Гарнець. – Київ : Кондор, 2009. – 386 с.

Допоміжна

1. Дробот О. С. Макро- і мікроструктура металів та сплавів : ілюстративні матеріали з курсу «Матеріалознавство» до практичних і лабораторних робіт для студентів інженерно-технічних напрямів підготовки / О. С. Дробот, О. П. Бабак, О. О. Нікітін. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 53 с.
2. Дробот О. С. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань : метод. вказ. до вивч. курсу. / О. С. Дробот. – Хмельницький : ХНУ, 2012. – 71 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Властивості металів

| № з/п | Хімічний елемент | Температура плавлення, °С | Питома вага, г/см ³ (10 ³ кг/м ³) | Твердість НВ, кгс/мм ² (10 Н/мм ²) | Міцність, кгс/мм ² (10 Н/мм ²) |
|-------|------------------|---------------------------|--|--|--|
| 1 | Fe | 1539 | 7,8 | 45–55 | 18–25 |
| 2 | Au | 1036 | 19,32 | 18 | – |
| 3 | Ag | 960 | 10,49 | 20 | – |
| 4 | Cu | 1083 | 8,96 | 90–120/35–40 | 40–50/20–24 |
| 5 | V | 1900 | 6,11 | 65–110 | – |
| 6 | Mo | 2625 | 10,2 | 125 | 70 |
| 7 | Ti | 1800 | 4,54 | 85 | 32 |
| 8 | Cr | 1800–1910 | 7,15 | – | 42,1 |
| 9 | Ni | 1455 | 8,9 | 40–50 | 60–70 |
| 10 | Nb | 2500 | 8,57 | 45–75 | – |
| 11 | Al | 659 | 2,7 | 13–20/25–35 | 8/15 |
| 12 | Mg | 650 | 1,74 | 25–50 | 8,5–25 |
| 13 | Sn | 232 | 7,3 | 4,5–5,0 | 2 |
| 14 | Pb | 327 | 11,34 | 3 | 2 |
| 15 | Zn | 419 | 7,13 | 30–40 | 10–17 |

Діаграми стану двокомпонентних сплавів

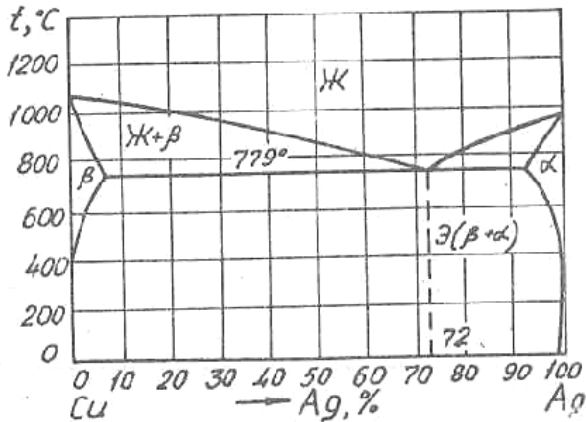


Рис. А.1 – Діаграма стану системи «мідь–срібло»

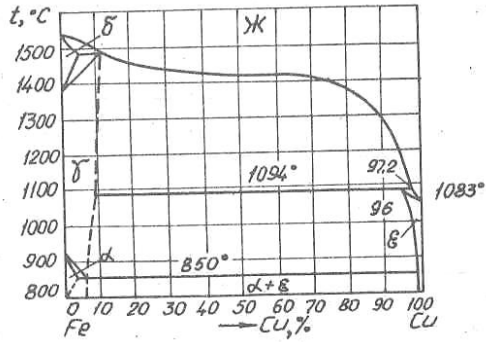


Рис. А.2 – Діаграма стану системи «залізо–мідь»

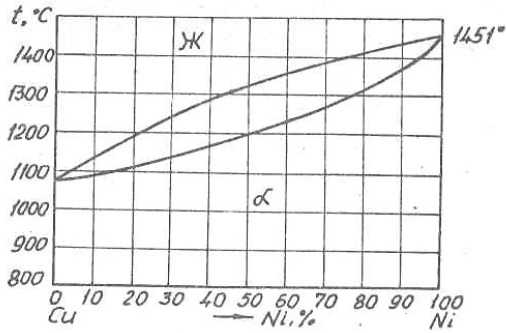


Рис. А.3 – Діаграма стану системи «мідь–нікель»

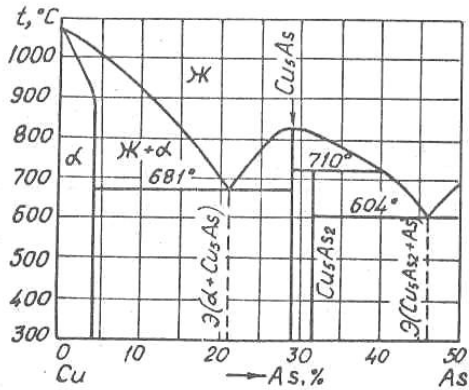


Рис. А.4 – Діаграма стану системи «мідь–миш'як»

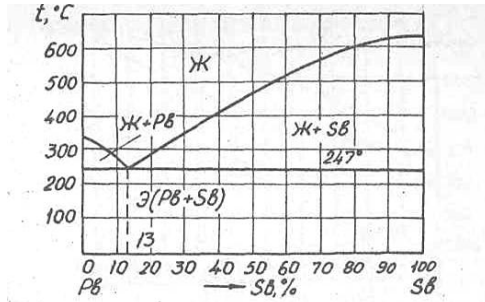


Рис. А.5 – Діаграма стану системи «свинець–сурма»

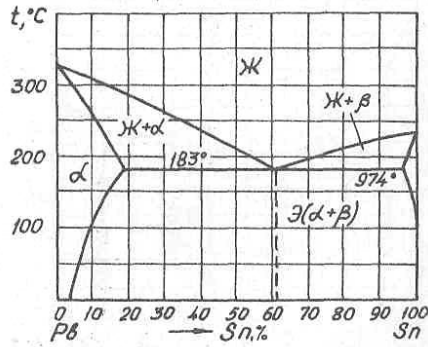


Рис. А.6 – Діаграма стану системи «свинець–олово»

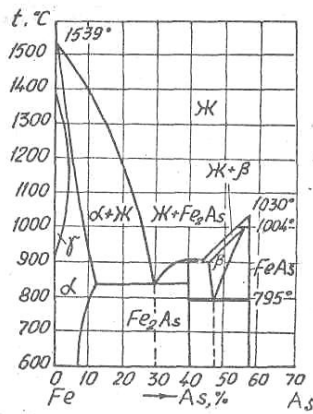


Рис. А.7 – Діаграма стану системи «залізо–миш'як»

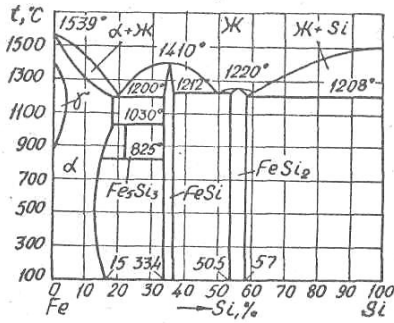


Рис. А.8 – Діаграма стану системи «залізо–кремній»

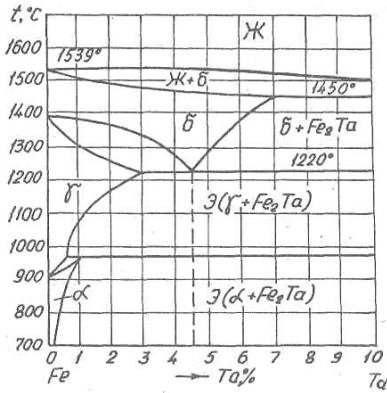


Рис. А.9 – Діаграма стану системи «залізо–тантал»

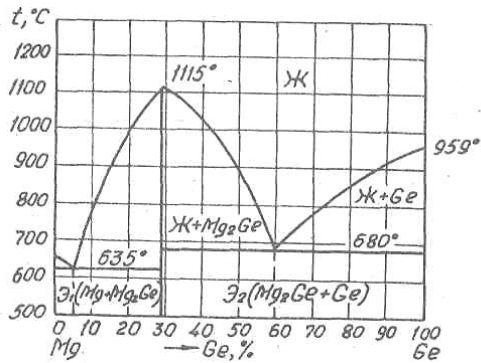


Рис. А.10 – Діаграма стану системи «магній–германій»

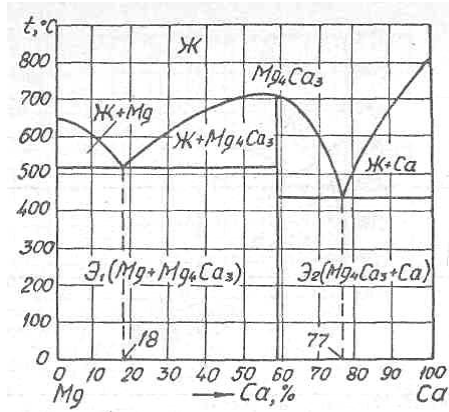


Рис. А.11 – Діаграма стану системи «магній–кальцій»

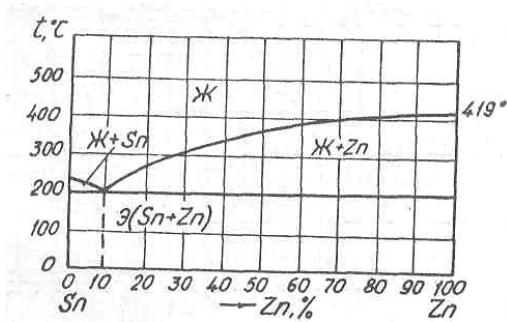


Рис. А.12 – Діаграма стану системи «олово–цинк»

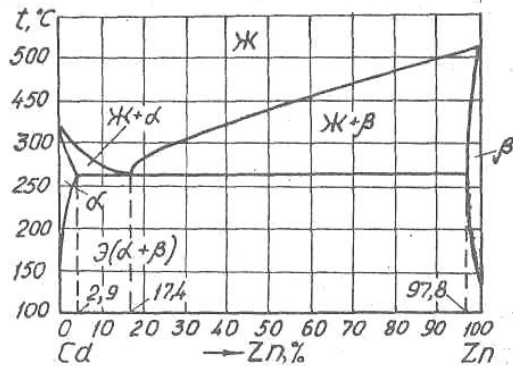


Рис. А.13 – Діаграма стану системи «кадмій–цинк»

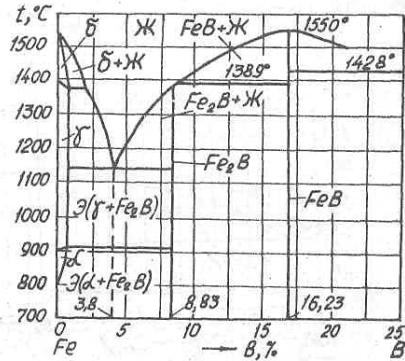


Рис. А.14 – Діаграма стану системи «залізо–бор»

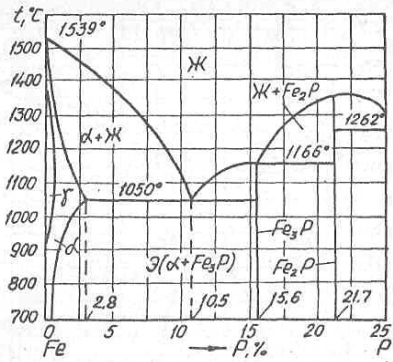


Рис. А.15 – Діаграма стану системи «залізо–фосфор»

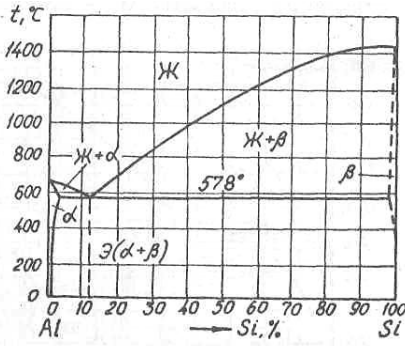


Рис. А.16 – Діаграма стану системи «алюміній–кремній»

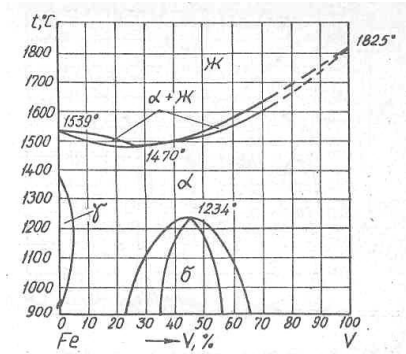


Рис. А.17 – Діаграма стану системи «залізо–ванадій»

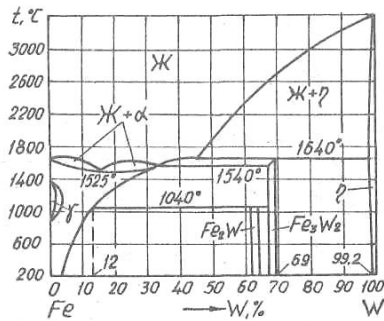


Рис. А.18 – Діаграма стану системи «залізо–вольфрам»

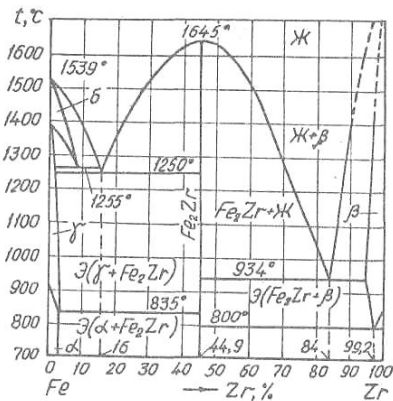


Рис. А.19 – Діаграма стану системи «залізо–цирконій»

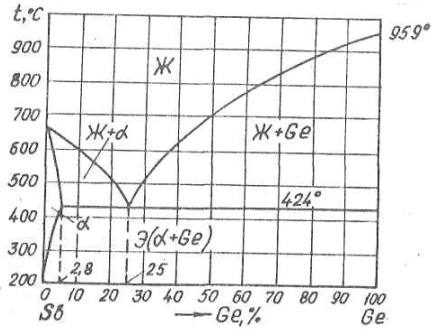


Рис. А.20 – Діаграма стану системи «сурма–германій»

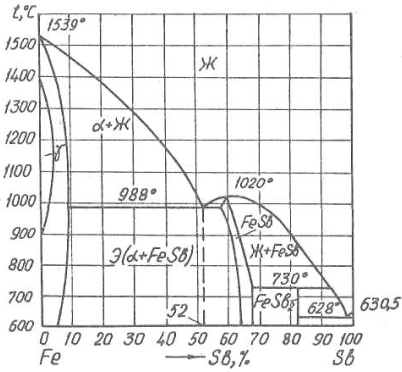


Рис. А.21 – Діаграма стану системи «залізо–сурма»

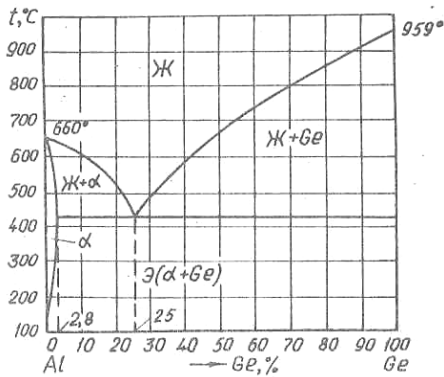


Рис. А.22 – Діаграма стану системи «алюміній–германій»

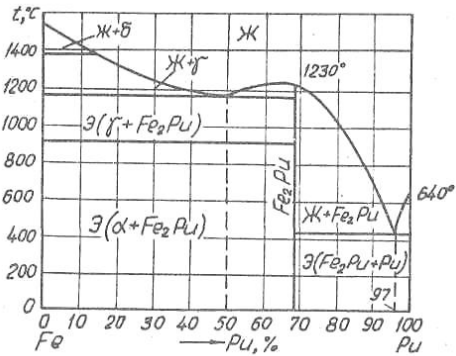


Рис. А.23 – Діаграма стану системи «залізо–плутоній»

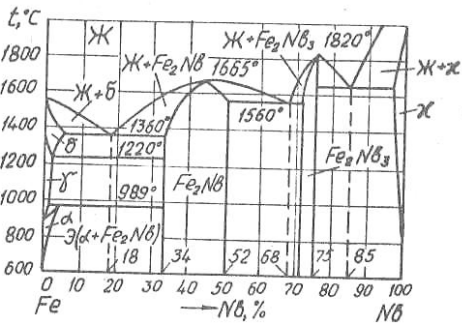


Рис. А.24 – Діаграма стану системи «залізо–ніобій»

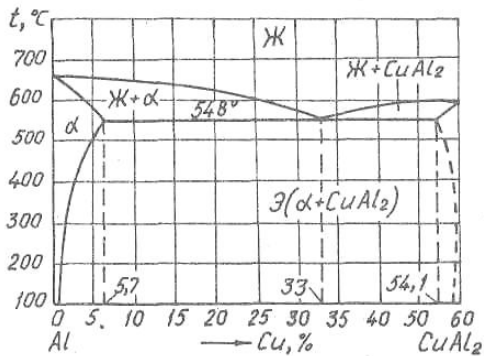


Рис. А.25 – Діаграма стану системи «алюміній–мідь»

Зміст

| | |
|--|----|
| Вступ | 3 |
| Тема 1 | |
| Атомно-кристалічна будова металів | 5 |
| Тема 2 | |
| Пластична деформація і рекристалізація металів | 15 |
| Тема 3 | |
| Основи теорії сплавів. Діаграми стану двокомпонентних сплавів | 24 |
| Тема 4 | |
| Сплави на основі заліза та вуглецю. Діаграма стану системи «залізо–вуглець» | 40 |
| Тема 5 | |
| Основи термічної та хіміко-термічної обробки сталі | 60 |
| Тема 6 | |
| Конструкційні матеріали | 87 |
| Література | 98 |
| Додаток А | 99 |