

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчально-методична праця для здобувачів ступеня бакалавра
за спеціальністю 163 Біомедична інженерія

Укладач: Л. Д. Тарасова

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2021

УДК 546.3+669.1/.2(075.8)
М55

Укладач: *Тарасова Лариса Дмитрівна, канд. техн. наук*

Рецензент *Отиченко О. М., канд. техн. наук, відділ функціональних матеріалів медичного призначення Інституту проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України*
Беспалова О. Я., канд. біол. наук, с. н. с., кафедра трансляційної медичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Зубчук В.І., канд. техн. наук, доцент*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 1 від 16.09.2021 р.)
за поданням вченої ради факультету біомедичної інженерії (протокол № X від DD.MM.YYYY р.)*

М55 Матеріалознавство та конструкційні матеріали [Електронний ресурс] : конспект лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. 163 Біомедична інженерія / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Л. Д. Тарасова. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 201 с.

Конспект лекцій містить необхідний теоретичний матеріал, контрольні питання. Представлений матеріал може використовуватися здобувачами вищої освіти для самостійної роботи при дистанційному вивченні курсу «Матеріалознавство та конструкційні матеріали», при виконанні практичних завдань, а також при підготовці до екзамену або заліку.

УДК 546.3+669.1/.2(075.8)

Реєстр. № НП XX/XX-XXX.. Обсяг 9 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЛЕКЦІЯ 1. Введення в дисципліну. Кристалічна будова металів	5
ЛЕКЦІЯ 2. Дефекти кристалічної будови	24
ЛЕКЦІЯ 3. Механічні властивості матеріалів	39
ЛЕКЦІЯ 4. Пластична деформація і механізми зміцнення	52
ЛЕКЦІЯ 5. Основи теорії сплавів	65
ЛЕКЦІЯ 6. Діаграми стану сплавів	74
ЛЕКЦІЯ 7. Діаграми стану сплавів з утворенням хімічної сполуки ...	88
ЛЕКЦІЯ 8. Залізо та його взаємодія з вуглецем	99
ЛЕКЦІЯ 9. Залізовуглецеві сплави	112
ЛЕКЦІЯ 10. Основи термічної обробки	120
ЛЕКЦІЯ 11. Загальна класифікація сталей	131
ЛЕКЦІЯ 12. Чавуни	142
ЛЕКЦІЯ 13. Леговані сталі	151
ЛЕКЦІЯ 14. Кольорові метали. Мідь та її сплави	163
ЛЕКЦІЯ 15. Кольорові метали. Алюміній, магній, титан	170
ЛЕКЦІЯ 16. Порошкові матеріали	179
ЛЕКЦІЯ 17. Конструкційні неметалеві матеріали. Термопласти	188
ЛЕКЦІЯ 18. Конструкційні неметалеві матеріали. Реактопласти	195
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	200

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Матеріалознавство та конструкційні матеріали» відноситься до нормативних освітніх компонентів циклу професійної підготовки, базується на знаннях окремих розділів математики, загальної фізики, неорганічної хімії та складає необхідний фундамент для подальшого опанування дисциплін за спеціальністю 163 Біомедична інженерія. Під час вивчення дисципліни студенти набувають вмінь і досвіду практичного застосування знань з матеріалознавства для обґрунтованого вибору конструкційних матеріалів з наперед заданими властивостями.

Конспект лекцій з курсу «Матеріалознавство та конструкційні матеріали» спрямований на формування компетентностей у відповідності до освітньо-професійних програм «Медична інженерія», «Регенеративна та біофармацевтична інженерія».

Тематика лекцій зорієнтована на оволодіння теоретичними та практичними підходами для вирішення широкого кола задач спеціальності 163 Біомедична інженерія.

До конспекту увійшли лекції, що містять загальні відомості про конструкційні матеріали, їх механічні характеристики та властивості, інформацію про кристалічну будову металів тощо. Кожна лекція включає теоретичні відомості та контрольні питання.

Підготовка відповідей на контрольні питання спонукають студентів до ретельного ознайомлення з теоретичним матеріалом, представленим у лекціях або розглянутим студентом в рамках самостійної роботи.

ЛЕКЦІЯ 1

ВВЕДЕННЯ В ДИСЦИПЛІНУ

КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ

Різноманітні умови експлуатації обладнання і виробів, що застосовуються в галузі біомедичної інженерії, призвело до необхідності раціонального вибору матеріалів.

Недостатня довговічність обладнання призводить до значних витрат на виготовлення запасних деталей і ремонт. Підвищення довговічності обладнання і виробів, в значній мірі, може бути досягнуто правильним вибором матеріалу для їх виготовлення і раціональним технологічним процесом їх обробки.

Поняття про матеріалознавство, як науку

Матеріалознавство – наука, що встановлює зв'язок між складом, структурою та властивостями металів і сплавів та вивчає закономірності їх змін при теплових, хімічних і механічних впливах. Матеріалознавство є основою для вивчення багатьох спеціальних дисциплін.

Серед механічних властивостей *міцність* займає особливе місце, оскільки перш за все від неї залежить цілісність виробів під впливом експлуатаційних навантажень. Вчення про міцність і руйнування є однією з найважливіших складових частин матеріалознавства. Воно є теоретичною основою для вибору відповідних конструкційних матеріалів для деталей різного цільового призначення і пошуку раціональних способів формування в них необхідних властивостей, для забезпечення надійності і довговічності виробів. Відкриття металів мав визначальний вплив на життя суспільства, розмежувавши його розвиток на «доісторичну» (кам'яна доба) та «історичну» епохи. Видобуток руд забезпечив людство принципово новими матеріалами, які мали невідомі раніше властивості (ковкість, плавкість) та важливі переваги

(здатність до зміни форми, висока міцність, експлуатаційна довговічність). Це дозволило не тільки ефективно вдосконалювати наявні знаряддя, але й створювати їх численні нові типи, що відкрило можливості для технічного прогресу. До 70-х років XIX ст. були досягнуті істотні успіхи у розробці наукових основ металургії.

При зростанні виробництва металевих сплавів та їх застосування, виникла потреба у розв'язанні наступних задач:

- зменшення вигорання металу в процесі плавки;
- необхідність заміни деревного вугілля мінеральним паливом;
- розробка раціональних способів переробки збіднених руд;
- підвищення механічних властивостей металів і сплавів та інші.

Наукові основи металургії почали складатися ще в XVIII ст., спочатку вони базувалися на аналізі та узагальненні розрізаних емпіричних знань про метали і сплави, їх отримання, властивості, обробку. Потім емпіричні знання стали пов'язувати із законами фізики, хімії та інших наук. Початок розробки теоретичних основ вчення про метали було покладено працями французького дослідника Рене Реомюра, російського вченого Михайла Ломоносова, французького хіміка Антуана Лавуазьє.

У розробці теорії металургійних процесів в XIX ст. важко переоцінити значення праць Жозефа Пруста (закон сталості складу хімічних сполук), Єремія Бенджамін Ріхтера (закон еквівалентів), Джона Дальтона (закон простих кратних відносин), а також робіт Клода. Бертолле, Єнс Якоб Берцеліуса і багатьох інших видатних хіміків.

Французькі хіміки Ж. Гей-Люссак і Луї Жак Тенар, ґрунтуючись на своїх дослідженнях, попередників і сучасників, встановили існування трьох основних оксидів заліза. Велику роль у розвиток наукової металургії відіграло відкриття німецьким вченим Ейльгардом Мітчерлихом явища ізоморфізму (здатність атомів і молекул до взаємного заміщення у кристалічних ґратках).

Дуже плідними для розвитку теоретичної металургії були роботи Саді Карно, Джеймса Джоуля, Роберта фон Маєра (обґрунтував перший закон термодинаміки) та інших природознавців, які зробили великий внесок у розробку вчення про теплоту. На основі цих робіт була встановлена методика дослідження ендотермічних та екзотермічних реакцій, що має найважливіше значення при розробці енергетичного балансу технологічних процесів у металургії.

Вперше існування зв'язку між будовою сталі та її властивостями було встановлено Павлом Аносовим (1799 – 1839). П. Аносов став першим металургом, який почав планомірне вивчення впливу на сталь різних елементів. Він досліджував добавки золота, платини, марганцю, хрому, алюмінію, титану та інших елементів і першим довів, що фізико-хімічні та механічні властивості сталі можуть бути значно змінені та поліпшені добавками деяких легуючих елементів. П. Аносов заклав основи металургії легованих сталей.

Основи наукового матеріалознавства були закладені відомим металургом Дмитром Черновим (1839 – 1921) та розвинуті Миколою Курнаковим. У 1866 – 1868 роках Д. Чернов встановив залежність структури і властивостей сталі від механічної та термічної обробки; відкрив критичні температури (названі точками Чернова), при яких у сталі, в результаті її нагрівання або охолодження в твердому стані, відбуваються фазові перетворення, що істотно змінюють структуру і властивості металу. Як хімік, М. Курнаков відомий створенням методів фізико-хімічного аналізу речовин, особливо розчинів солей та сплавів. Створена М. Курнаковим діаграма «склад – властивості» значно полегшила роботу хіміків з аналізу металевих сплавів.

У 1888 р. французький вчений Флорис Осмонд, використавши термоелектричний термометр Анрі Луї Ле Шательє, з великою точністю виміряв температури, що характеризують початок поліморфних перетворень у сталі. В подальшому Ф. Осмонд описав характер цих перетворень і присвоїв назви основним структурам залізвуглецевих сплавів.

Визначення атомної будови фаз стало можливим після відкриття Макс фон Лауе (Нобелівський лауреат), який довів, що атоми у кристалі регулярно заповнюють простір, утворюючи просторові дифракційні решітки, і що рентгенівські промені мають хвилеву природу. Дифракція рентгенівських променів на таких решітках дає можливість досліджувати будову кристалів. Останнім часом для структурного аналізу окрім рентгенівських променів використовують також електрони і нейтрони. Відповідні методи дослідження називаються електронною графією і нейтронною графією. Електронна оптика дозволила удосконалити мікроскопію. У даний час на електронних мікроскопах максимальне збільшення доведено до 100000 разів.

У п'ятидесятих роках, коли почалося дослідження властивостей нових металевих матеріалів, було доведено, що більшість властивостей, зокрема опір пластичній деформації і руйнуванню при різних умовах навантаження, залежать від особливостей тонкої кристалічної будови. Цей висновок сприяв залученню теорій про будову реальних металів. Так, завдяки теорії дислокацій вдалося отримати достовірні відомості про зміни в металах при їх пластичних деформаціях. Особливо інтенсивно розвивається металознавство останнім часом. Це пояснюється потребою в нових матеріалах для дослідження космосу, розвитку електроніки, атомної енергетики, нафтогазовидобувної та біоінженерної галузі тощо.

Головним завданням металознавства є створення матеріалів із заздалегідь розрахованими властивостями стосовно заданих параметрів і умов роботи. Велика увага приділяється вивченню металів в екстремальних умовах (низькі і високі температури, тиск).

До теперішнього часу основною матеріальною базою машинобудування була чорна металургія, що застосовує сталі і чавуни. Ці матеріали мають багато позитивних якостей і, в першу чергу, забезпечують високу конструкційну міцність деталей машин. Проте, ці класичні матеріали мають такі недоліки як велика густина, низька корозійна стійкість.

Втрати від корозії складають 20 % річного виробництва сталі і чавуну. Тому, за даними наукових досліджень, через 20-40 років усі розвинені країни перебудуються на масове використання металевих сплавів на базі титану, магнію, алюмінію. Ці легкі та міцні сплави дозволяють у 2-3 рази полегшити верстати і машини, в 10 разів зменшити витрати на їх ремонт. За даними провідних науковців, в нашій країні є всі умови для того, щоб протягом 10-15 років машинобудування могло перейти на випуск алюмінієво-титанової рухомої техніки, яка відрізняється легкістю, корозійною стійкістю і великим безремонтним ресурсом.

Українськими вченими, серед яких: Б.С. Патон, Д.А. Дутко, Б.І. Медовар, Б.А. Мовчан, В.К. Лебедев, І.М. Францевич, Г.С. Писаренко та інші, розроблено понад 2000 різних сплавів. У складі Національної академії наук України працюють потужні науково-дослідні інститути, які займаються металознавством, а саме:

Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України (м. Київ) – провідний центр науково-технічних розробок в галузі теоретичних основ створення нових матеріалів, технології їх одержання та виготовлення виробів з них зі спеціальними властивостями для задоволення потреб ядерної енергетики, електроніки, авіабудівної галузі, загального хімічного, транспортного і сільськогосподарського машинобудування, приладобудування, автоматики та інших областей техніки.

Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України (м. Київ) – один з найбільших науково-технічних матеріалознавчих центрів Європи. В Інституті розробляються технології отримання і використання синтетичних алмазів, кубічного нітриду бору та інших надтвердих матеріалів, високощільної технічної кераміки, твердих сплавів,

надпровідної кераміки. Розробляються технології виготовлення конструкційних матеріалів і виробів з них.

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України (м. Київ) – науково-дослідна установа у складі Відділення механіки Національної академії наук України.

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України (м. Київ) – дослідження фізико-хімічних процесів при виплавці, обробці та твердненні сплавів і створення технологічних засад одержання нових матеріалів, розробки обладнання та виготовлення металопродукції.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України (м. Київ) – найбільший в Україні та світі науково-технічний центр в галузі зварювання та спеціальної електрометалургії. Основні напрямки наукової діяльності: комплексні дослідження природи зварювання та паяння металевих і неметалевих матеріалів, створення на їхній основі технологічних процесів, матеріалів та обладнання; дослідження міцності та несучих властивостей зварних конструкцій і технології їх механізованого виробництва; розробка спец. електрометалургійних засобів отримання високоякісних сталей і сплавів, литих виробів і тонких покриттів з особливими властивостями.

Науково-технологічний комплекс «Інститут монокристалів» НАН України (м. Харків) – державна наукова установа, провідний науковий центр, в якому проводяться міждисциплінарні дослідження в багатьох пріоритетних напрямках сучасного матеріалознавства, фізики, хімії, біології та медицини.

Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків) – основні напрямки діяльності: матеріалознавство сцинтиляційних та люмінесцентних середовищ: фундаментальні дослідження взаємодії випромінювання з речовиною; розробка технологій та нанотехнологій отримання сцинтиляційних і створення пристроїв на їх основі.

Інститут чорної металургії імені З. І. Некрасова НАН України (м. Дніпро) – головна наукова організація галузі з основних проблем

металургійного виробництва. Основні напрямки наукової діяльності: розвиток наукових основ формоутворення залізобуглецевих сплавів і управління їх структурою та властивостями; розробка нових енергозберігаючих технологій, обладнання, систем контролю та управління у виробництві чавуну, сталі та прокату; дослідження фізико-хімічних та термодинамічних процесів у багатокомпонентних металевих системах та рідкому стані шлакометалевих розплавів і розробка нових матеріалів з наперед заданими властивостями; Науково-технічне супроводження Програми розвитку гірничо-металургійного комплексу України.

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів) – науково-дослідницький центр у галузі механіки руйнування і міцності матеріалів, фізико-хімічних процесів корозії, неруйнівного контролю дефектності матеріалів та технічної діагностики конструкцій та середовищ.

Кристалічна будова металів

Кристали – це тверді тіла, в яких атоми (іони) мають чітку тривимірну періодичність. Для характеристики внутрішньої структури кристалів користуються поняттям кристалічної решітки /гратки.

Кристалічна решітка - періодична тривимірна структура, в якій атоми (іони) займають фіксовані положення і перебувають на певних відстанях.

Найменший об'єм кристала, при трансляції якого по координатним осям відтворюється вся кристалічна решітка, називається елементарною кристалічною коміркою.

Геометрична будова елементарних комірок характеризує кристалографічну структуру речовини. Тому, за формою зручніше класифікувати елементарні комірки, а не кристали.

Комірка характеризується лінійними параметрами a , b , c - періодами кристалічної решітки (відстанями між атомами, що розташовані на ребрах

комірки, спрямованими вздовж осей x , y , z , відповідно) і кутами між координатними осями - α, β, γ (рис. 1.1).

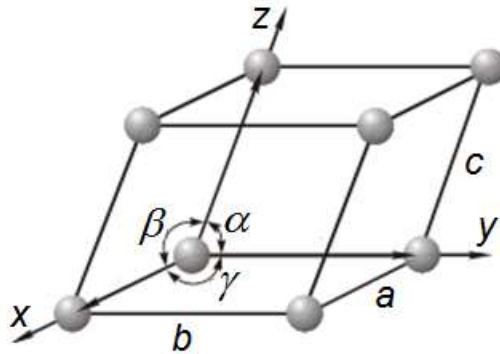


Рис. 1.1. Параметри кристалічної комірки

Тип елементарної комірки

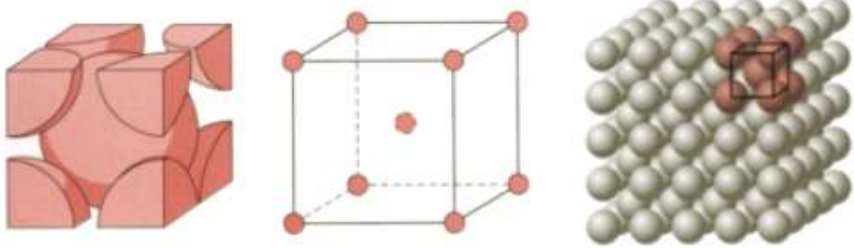
В залежності від кількості та розміщення вузлів розрізняють наступні елементарні комірки: прості, базоцентровані, гранецентровані, об'ємноцентровані.

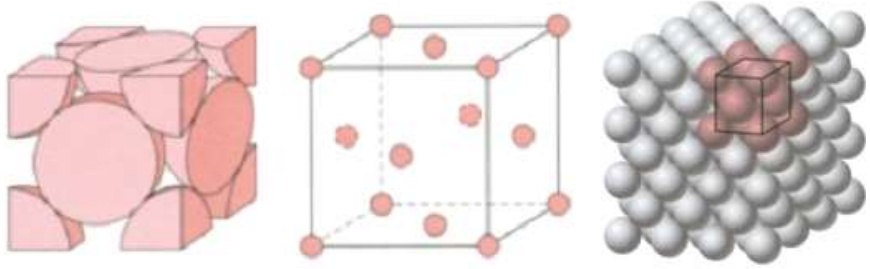
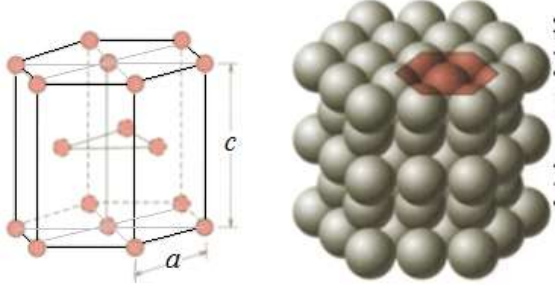
В елементарній простій комірці атоми/іони розташовані тільки у вершинах.

У складних - вони можуть знаходитися також усередині многогранника або на його гранях. Метали мають складні кристалічні решітки.

Найбільш поширені серед металів кристалічні структури представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Структура елементарної комірки	Схематичне зображення елементарної комірки
<p>Об'ємноцентрована кубічна (ОЦК) $a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$</p>	 <p>Li, Na, K, V, Cr, Fe, Rb, Nb, Mo, Cs, Ba, Eu, Ta, W, Fr, Ra</p>

<p>Гранецентрована кубічна (ГЦК) $a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$</p>	 <p>Al, Ca, Ni, Cu, Sr, Rh, Pd, Ag, Ce, Yb, Ir, Pt, Au, Pb, Ac, Th</p>
<p>Гексагональна щільного пакування (ГЩП) $a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$</p>	 <p>Be, Mg, Sc, Ti, Co, Zn, Y, Zr, Tc, Ru, Cd, Pr, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Hf, Re, Os, Tl</p>
<p>Інші структури</p>	<p>Mn, Ga, In, Sn, La, Nd, Pm, Sm, Hg, Bi, Po, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf</p>

В комірці ОЦК атоми знаходяться у вершинах куба і усередині нього – в точці перетину просторових діагоналей. В комірці ГЦК атоми знаходяться у вершинах куба і в центрі кожної грані. В комірці ГЩП атоми знаходяться у вершинах правильної шестигранної призми, в центрі кожної її основи і, крім того, три атоми розміщені усередині призми. Тип кристалічної решітки залежить від металу, температури і тиску. Це використовується при термообробці металів для поліпшення їх експлуатаційних властивостей.

Поліморфізм

У деяких металів (Fe, Sn, Ti та ін.) при зміні температури змінюється форма кристалічної решітки. Існування тієї самої речовини в різних кристалічних формах (модифікаціях) називають *поліморфізмом (алотропією)*, а перехід з однієї модифікації в іншу – поліморфним перетворенням. Внаслідок поліморфного перетворення утворюються нові кристалічні структури, що мають інший розмір і форму. Тому таке перетворення називають перекристалізацією. Поліморфні модифікації позначають $\alpha, \beta, \gamma, \dots$.

Поліморфне перетворення супроводжується стрибкоподібною зміною всіх властивостей металів і сплавів, а саме: питомого об'єму, теплоємності, теплопровідності, електропровідності, магнітних властивостей, механічних і хімічних властивостей і т. д.

Модель твердих куль

Для опису кристалічних решіток з будь-яким типом зв'язку зручно використовувати модель твердих куль, тобто вважати атоми або іони нестисливими кулями певного радіуса R , укладеними у просторі до зіткнення. Надалі, будемо називати ці уявні тверді кулі атомами. В моделі твердих куль для будь-якої структури вводять дві характеристики: координаційне число і коефіцієнт компактності (щільність пакування).

Координаційне число

Число однотипних атомів, що знаходяться у кристалічній ґратці на рівній найменшій відстані від даного атома, називається координаційним числом. Кожен атом простої кубічної ґратки має 6 найближчих сусідів (рис. 1.2), розташованих на відстані довжини ребра куба (на відстані періоду a ґратки). *Координаційне* число такої ґратки дорівнює 6 (КЧ=6).

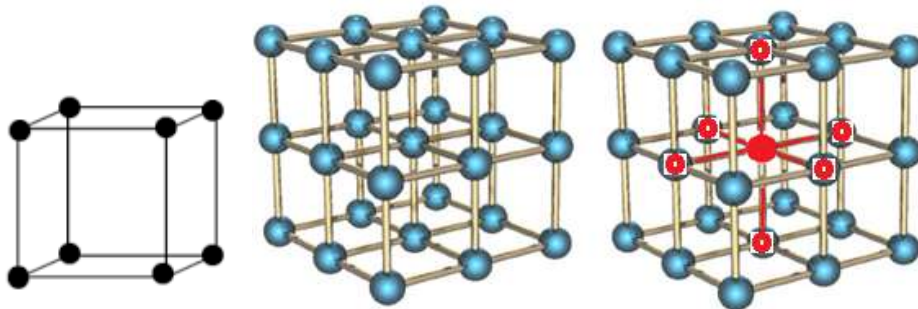


Рис. 1.2. Елементарна комірка простої кубічної ґратки

Найменша відстань між атомами в ОЦК-ґратці дорівнює половині просторових діагоналей (рис. 1.3). Доведемо це. Розглянемо прямокутний трикутник ACD і визначимо довжину просторової діагоналі CD :

$$AD = a; \quad AC = \sqrt{AB^2 + BC^2} = \sqrt{a^2 + a^2} = a\sqrt{2};$$

$$CD = \sqrt{AD^2 + AC^2} = \sqrt{a^2 + 2a^2} = a\sqrt{3}.$$

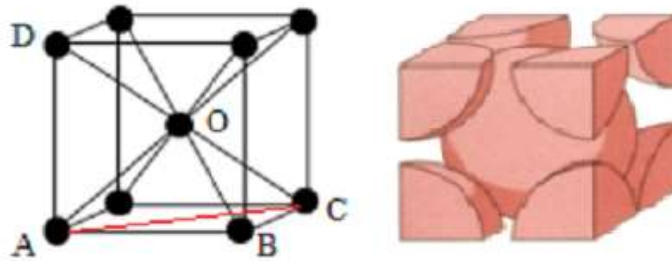


Рис. 1.3. Елементарна комірка ОЦК-гратки

Відстань від атома, що знаходиться усередині куба, до атомів, що знаходяться у вершинах, становить:

$$OD = \frac{CD}{2} = \frac{a\sqrt{3}}{2} = 0,866 a.$$

На цій відстані від центрального атома знаходяться 8 сусідів. Координаційне число ОЦК-гратки дорівнює 8 (КЧ=8).

У ГЦК і ГЦП гратках кожен атом має 12 найближчих сусідніх атомів. Відповідно координаційні числа для цих ґраток - 12.

Чим вище координаційне число, тим щільніше просторова кристалічна ґратка матеріалу.

Параметри елементарної комірки визначаються розмірами атомів, що її утворюють. При цьому вважають, що атоми, які представляють у вигляді твердих куль, торкаються один одного у напрямках комірки з найбільш щільним їх розташуванням.

Коефіцієнт компактності / щільність пакування

Коефіцієнт компактності – це відношення об'єму атомів V_A , що належать комірці, до об'єму всієї комірки V_K .

При визначенні кількості атомів, що належать комірці, треба враховувати не тільки кількість атомів, а також долю їх належності до комірки за допомогою коефіцієнтів:

- 1 - для атома, розташованого усередині комірки;
- 1/2 - для атомів, розташованих на гранях комірки;
- 1/8 - для атомів, що знаходяться у вершинах кубічної комірки;

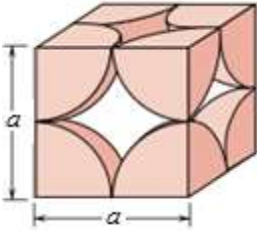
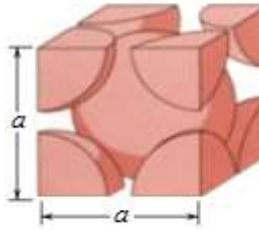
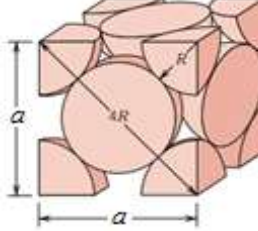
1/6 - для атомів, що знаходяться у вершинах ГЦП-комірки.

Наприклад, на одну елементарну комірку ОЦК-гратки припадає два атоми: один атом у центрі куба й один атом по об'єму вносять атоми, що розташовані у вершинах (кожний атом у вершині куба одночасно належить восьми суміжним елементарним коміркам і на дану комірку припадає лише 1/8 об'єму цього атома, а на всю комірку 1/8x8=1 атом).

На елементарну комірку ГЦК-гратки припадають чотири атоми, з них один атом вносять атоми, що розташовані у вершинах куба, а три вносять атоми, що знаходяться на гранях (1/2x6=3), тому що кожний з таких атомів належить двом граткам.

Основні характеристики кубічних кристалічних комірок наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

№	Основні характеристики кристалічної комірки з радіусом атомів R і параметром a	ПК Проста Кубічна 	ОЦК Об'ємно-центрована кубічна 	ГЦК Гранецентрована кубічна 
1.	Кількість атомів n, що належать одній комірці	1	2	4
2.	Об'єм атомів, що належать одній комірці V _A	$V_A = \frac{4}{3} \pi R^3$	$V_A = \frac{8}{3} \pi R^3$	$V_A = \frac{16}{3} \pi R^3$
3.	Залежність між параметром a кубічної комірки і радіусом R атома	$a = 2R$	$a = \frac{4}{\sqrt{3}} R$	$a = 2R\sqrt{2}$
4.	Об'єм комірки V _K = a ³	$V_K = 8R^3$	$V_K = \frac{64R^3 \sqrt{3}}{9}$	$V_K = 16R^3 \sqrt{2}$

5.	Коефіцієнт компактності $K = V_A / V_K$	$\frac{1}{6} \pi = 0,52$	$\frac{\sqrt{3}}{8} \pi = 0,68$	$\frac{\sqrt{2}}{6} \pi = 0,74$
----	--	--------------------------	---------------------------------	---------------------------------

Коефіцієнт компактності ПК-комірок дорівнює 52 %; ОЦК – 68 %; ГЦК і ГЦП – 74 %. Решта простору зайнята *порами*.

Розмір пори – це радіус сфери, що може бути розміщена між атомами. Радіус пор, в першу чергу, залежить від типу комірки та розмірів атомів, що входять до її складу. Так, наприклад, в центрі ГЦК-комірки розташована велика пора з розміром:

$$r_{\text{ГЦК}} = \frac{a - 2R}{2} = \frac{2R\sqrt{2} - 2R}{2} = R(\sqrt{2} - 1) = 0,414R.$$

В комірці ОЦК великих пор немає. Пори, розташовані на ребрах комірки і мають розміри:

$$r_{\text{ОЦК}} = \frac{a - 2R}{2} = \frac{\frac{4}{3}R\sqrt{3} - 2R}{2} = R\left(\frac{2}{3}\sqrt{3} - 1\right) = 0,155R.$$

В будь-якій комірці існують площини з різною щільністю в розташуванні атомів. Для знаходження площини найщільнішого пакування розраховують ретикулярну густину (щільність), що визначає кількість атомів на одиниці площі.

У різних напрямках кристалічної ґратки щільність розміщення атомів різна, що є причиною відмінності у властивостях кристала залежно від напрямку, в якому ця властивість виміряна. Ця властивість кристалів називається *анізотропією*.

У полікристалічних тілах в межах окремих зерен спостерігається анізотропія. Проте, оскільки орієнтація кристалічної решітки в різних зернах різна, в цілому по об'єму матеріалу властивості усереднюються.

Полікристалічні тіла з усередненою ізотропією прийнято називати *квазіізотропними*.

Якщо яким-небудь способом, наприклад тиском, зорієнтувати кристалічні решітки в зернах однаково (створити текстуру деформації), то таке полікристалічне тіло стане ізотропним.

Кристаліграфічні символи вузлів, напрямків і площин

Основні елементи кристалічних ґраток - це вузли, напрямки вузлових атомних рядів, а також атомно-кристалічні площини. Для їх позначення застосовують спеціальні кристаліграфічні символи. Символ складається із трьох або чотирьох чисел, записаних у спеціальних для кожного структурного елемента дужках.

Вузли, напрямки і площини у кристалічній ґратці прийнято позначати трійками чисел h , k , l – індексами Міллера.

Індекси вузла – координати вузла, що виражені в одиницях параметрів комірки (рис. 4). Записується індекс вузла у подвійних квадратних дужках: $[[001]]$ або без дужок 001. Знак мінус пишеться над цифрою.

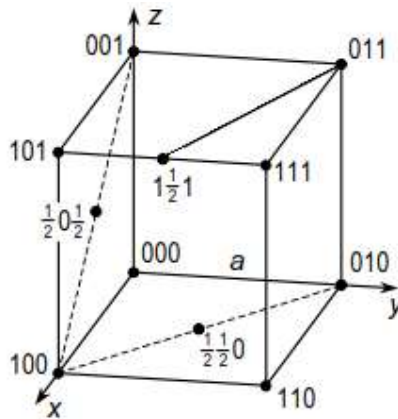


Рис. 1.4. Індекси вузлів

За **індекси напрямку**, що проходить через початок координат (рис.5), приймають координати першого вузла, що лежить на цьому напрямку. Індекси напрямків записуються в одинарні квадратні дужки: $[100]$, $[111]$. Якщо який-небудь з індексів від'ємний, то мінус ставлять над цифрою, наприклад $[01\bar{1}]$.

Індекси напрямку завжди представляють у вигляді трьох простих цілих чисел, при цьому, замість $[01\frac{1}{2}]$ пишуть $[021]$, замість $[\bar{2}\bar{2}\bar{4}]$ пишуть $[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$.

Якщо напрямок не проходить через початок координат (рис. 6), то потрібно скористатися векторним правилом – від координат кінця вектора напрямку відняти відповідні координати початку вектора напрямку.

Індекси напрямку описують нескінченну пряму. В ряді випадків необхідно задати вектор певної довжини. Координатами вектора є його проєкції на осі координат. При записі вектора прийнято залишати у дужках індекси напрямку (три простих цілих числа), уздовж якого розташований вектор, а загальний множник виносити перед дужками. Наприклад:

$$\left[a, -\frac{1}{2}a, 0 \right] = \frac{1}{2}a [2\bar{1}0].$$

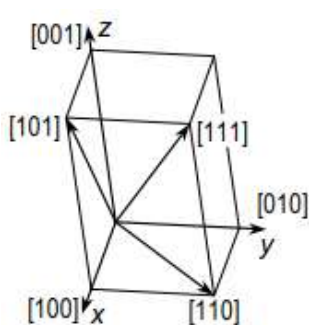


Рис. 1.5. Індекси напрямків, що проходить через початок координат

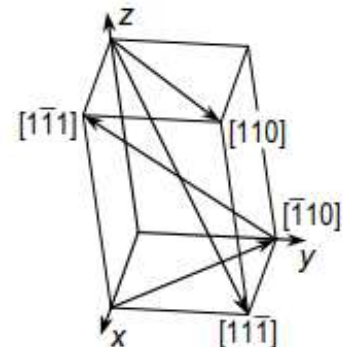
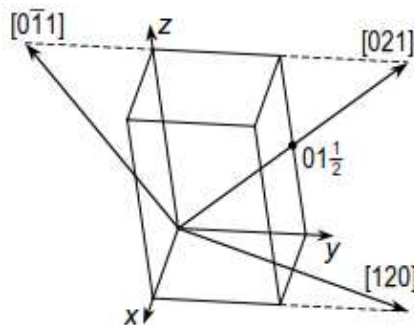
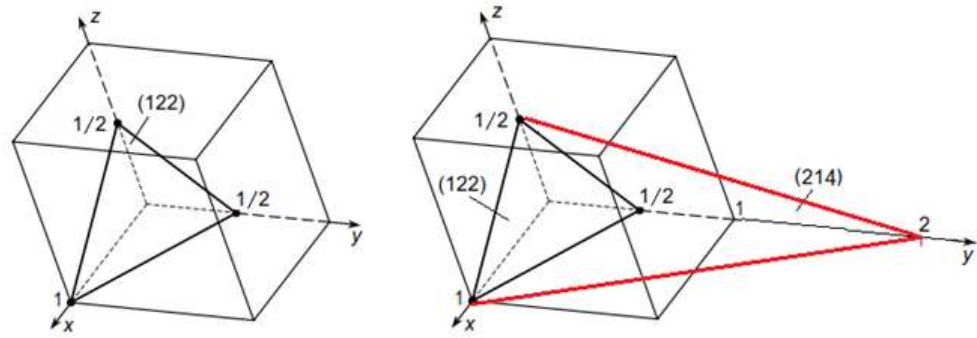


Рис. 1.6. Індекси напрямків, що не проходять через початок координат

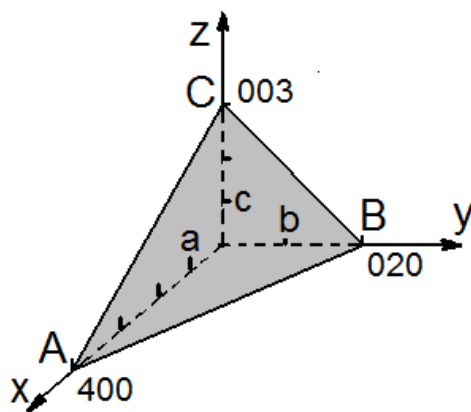
Індeксaми площини, що не проходить через початок координат (рис. 1.7), є три цілих числа, які є оберненими величинами відрізків, що відсікаються даною площиною на координатних осях. **За одиниці довжини відрізків приймають параметри комірки a, b, c** . Індекси площини беруть у круглі дужки. Наприклад, площина відсікає на осях x, y, z відповідно відрізки $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$. Індекси цієї площини будуть мати вигляд (122) . Індекси площин завжди приводять до трьох простих цілих чисел.



$$h:k:l = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{1}{\frac{1}{2}} = 1:2:2 \rightarrow (122)$$

$$h:k:l = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{1}{\frac{1}{2}} = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{2}{1} = \frac{2}{2} : \frac{1}{2} : \frac{4}{2} = 2:1:4 \rightarrow (214)$$

Рис. 1.7. Визначення індексів площини



$$h:k:l = \frac{1}{a} : \frac{1}{b} : \frac{1}{c} = \frac{1}{4} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} =$$

$$= \frac{3}{12} : \frac{6}{12} : \frac{4}{12} = 3:6:4 \rightarrow (364)$$

Рис. 1.8. Визначення індексів площини ABC

Якщо площина паралельна одній з осей (перетинається в нескінченності), то відповідний індекс дорівнює нулю ($1/\infty = 0$).

Якщо початок координат лежить у площині, тоді площину необхідно перенести паралельно самій собі так, щоб вона не проходила через початок координат і перетинала осі координат або перенести систему координат паралельно самій собі.

Індекси площин завжди приводять до трьох простих цілих чисел. Приклади індексації площин наведено на рис. 1.9.

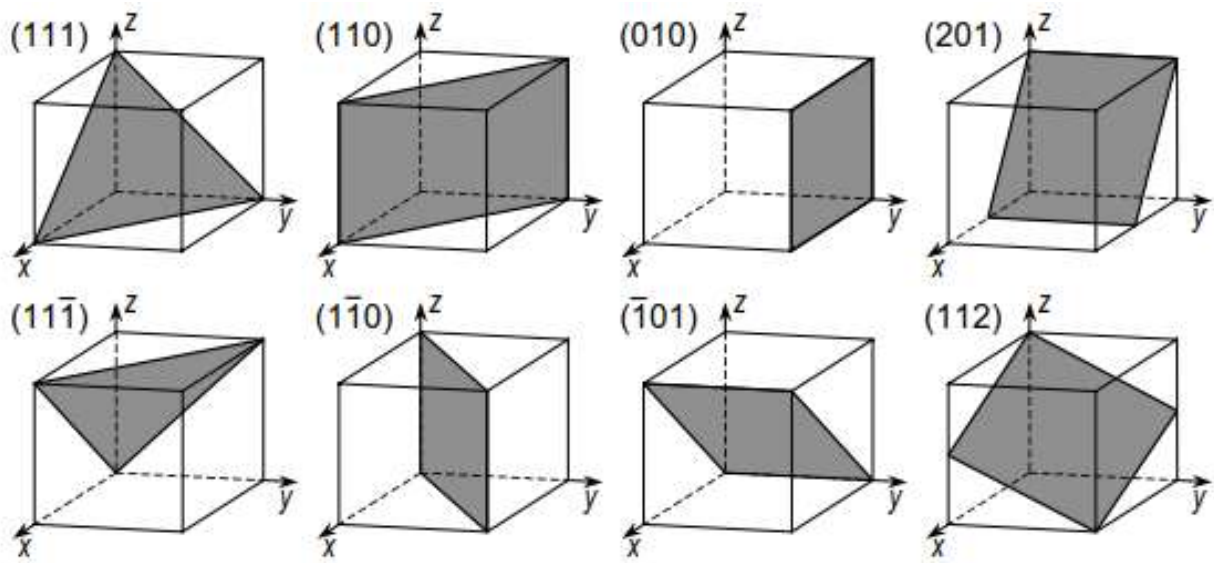


Рис. 1.9. Індеси площин кубічних комірок

Основні формули кристалографії кубічних кристалів

Індеси нормалі до площини збігаються з індесами самої площини, тобто:

$$[hkl] \perp (hkl) \quad (1.1)$$

Відстань між сусідніми паралельними атомними площинами (hkl) дорівнює:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (1.2)$$

де a – параметр комірки.

Кут між двома напрямками $[h_1k_1l_1]$ і $[h_2k_2l_2]$ знаходять за правилом скалярного добутку:

$$\cos \varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} \quad (1.3)$$

Наприклад, для напрямків $[01\bar{1}]$ і $[12\bar{1}]$:

$$\cos \varphi = \frac{0 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + (-1) \cdot (-1)}{\sqrt{0^2 + 1^2 + (-1)^2} \cdot \sqrt{1^2 + 2^2 + (-1)^2}} = \frac{3}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{6}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \rightarrow \varphi = 30^\circ$$

Кут між двома площинами дорівнює куту між їх нормаллями і може бути знайдений за формулою (1.3).

Умова належності напрямку $[h_1k_1l_1]$ до площини $(h_2k_2l_2)$ має вигляд:

$$h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2 = 0 \quad (1.4)$$

Для кубічних кристалів ця ж умова визначає перпендикулярність двох напрямків або двох площин.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть і охарактеризуйте основні етапи розвитку матеріалознавства.
2. Надайте загальну характеристику металів.
3. Перелічіть типи зв'язків у твердих тілах і охарактеризуйте металічний тип зв'язку.
4. Надайте визначення кристалам, назвіть їх елементи.
5. Дайте визначення елементарній комірці та охарактеризуйте її параметри.
6. Накресліть схематично гранецентровану і об'ємноцентровану кубічні комірки. Чим вони відрізняються?
7. Координаційне число для кристала NaCl дорівнює 6. Як це відбилося на його кристалічній структурі?
8. Назвіть і охарактеризуйте основні типи кристалічних решіток для сполук з металічним типом зв'язку.
9. В чому полягає суть моделі твердих куль.
10. Виведіть залежність між радіусом R атома і параметром a об'ємноцентрованої кубічної комірки.
11. Виведіть залежність між параметром a гранецентрованої кубічної комірки і радіусом R атома.
12. Що розуміють під координаційним числом атома (іона)?
13. Скільки атомів належить кожній з кристалічних комірок ПК, ОЦК, ГЦК?

Поясніть, як визначається кількість атомів, що належить коміркам ПК, ОЦК, ГЦК.

14. Охарактеризуйте коефіцієнт компактності та ретикулярну густину. Як знайти найбільш щільнопаковану площину в комірці?
15. У чому полягає суть поліморфізму? Наведіть приклади цього явища.
16. Назвіть основну причину анізотропії кристалів.
17. Наведіть принципи індексування вузлів і напрямків. Як розташовані координатні осі в ґратках?
18. Наведіть принципи індексування площин.
19. Поясніть, як довести приналежності прямої до певної площини кристалічної комірки.

ЛЕКЦІЯ 2

ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ БУДОВИ

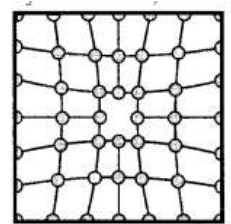
Кристали, що зустрічаються в природі, як монокристали, так і зерна в полікрystalах, ніколи не мають ідеальну періодичність у розташуванні атомів /іонів. Реальні кристали завжди мають ті або інші дефекти, що суттєво впливають на властивості матеріалів.

Дефекти в кристалах прийнято класифікувати на: точкові, лінійні, поверхневі, об'ємні.

Точкові дефекти

Точковими дефектами називаються такі порушення періодичності кристалічної ґратки, розміри яких у всіх трьох напрямках порівнянні з розмірами параметра кристалічної ґратки. Розмір точкового дефекту $0,1 \text{ нм} = 1 \text{ \AA} (10^{-10} \text{ м})$.

Вакансії - Найпростішим з точкових дефектів є вакансія, або вільний вузол решітки, в якому відсутній атом. Всі кристалічні тверді речовини містять вакансії і неможливо створити такий матеріал, який був би вільний від цих дефектів.



Вакансії утворюються в результаті того, що в кристалі завжди є атоми, кінетична енергія яких більша за середню. Якщо такі атоми розташовані поблизу поверхні, то вони можуть переміститися на поверхню кристала, а їх місця у вузлах кристалічної решітки займають атоми, що розташовані далі від поверхні. В результаті деякі вузли кристалічної решітки виявляються вільними, тобто утворюються вакансії. Кількість вакансій при кімнатній температурі незначна, але вона суттєво зростає при підвищенні температури. Кількість вакансій поблизу температури плавлення може досягати 1% кількості атомів у кристалі.

Утворення вакансій сприяє переміщенню атомів, відіграє важливу роль в процесах дифузії, повзучості та спіканні в металах і сплавах; впливає на деякі фізичні властивості (електропровідність, магнітні властивості). На міцність вакансії не впливають.

Вакансії, що виникають за рахунок виходу атома з вузла на поверхню кристала або на яку-небудь границю всередині кристала, називають дефектами Шотткі (рис. 2.1).

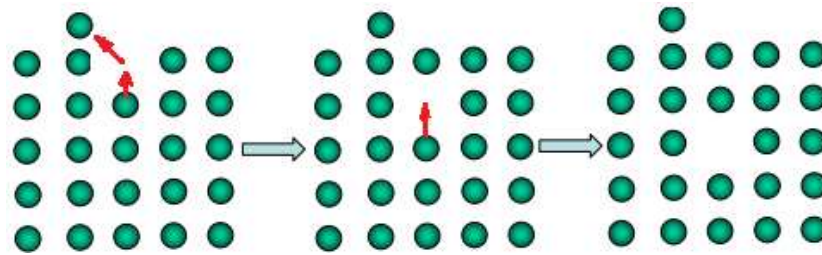


Рис. 2.1. Механізм утворення вакансій за Шотткі

Парний дефект (вакансія + міжвузловий атом), що виникає за рахунок переходу атома з вузла ґратки у міжвузелле, називають дефектом Френкеля (рис. 2.2).

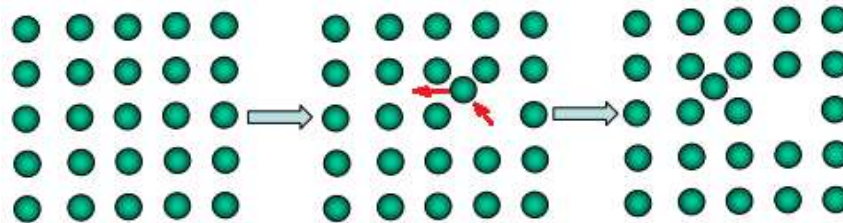


Рис. 2.2. Механізм утворення вакансії та міжвузлового атома за Френкелем

Точкові дефекти типу вакансій є в кожному кристалі, як би ретельно він не вирощувався. Більше того, у реальному кристалі вакансії постійно зароджуються й зникають під дією теплових флуктуацій. Рівноважна кількість вакансій N_v для заданої кількості матеріалу залежить від температури, зростає з температурою T і визначається за формулою Больцмана:

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right), \quad (1.1)$$

де N – число атомів в одиниці об'єму кристала;

Q_v – енергія для утворення вакансії, еВ/атом; T – абс. температура, °К;

k – постійна Больцмана,

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{атом} \cdot \text{К} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ еВ} / \text{атом} \cdot \text{К}.$$

Число атомів в одиниці об'єму кристала:

$$N = \frac{N_A \rho}{A_M}, \quad (1.2)$$

де ρ – густина, г/см³, кг/м³;

A_M – атомна маса, г/моль;

N_A – число Авогадро, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ (кількість атомів в одному молі).

Густину визначають за формулою:

$$\rho = \frac{n A_M}{V_K N_A}, \quad (1.3)$$

де n – кількість атомів в елементарній комірці; V_K – об'єм елементарної комірки.

Кількість атомів в елементарній комірці визначається за формулою (2.3):

$$n = \frac{\rho V_K N_A}{A_M}, \quad (1.4)$$

Міжвузлові атоми - це атоми, що знаходяться поза вузлів кристалічної ґратки (рис. 2.3). Цей дефект призводить до значних спотворень у навколишній решітці, тому що атом істотно більше, ніж пора, в якій він знаходиться. Формування цього дефекту маловірогідно, він існує в дуже малих концентраціях, які значно нижчі, ніж для вакансій.

Домішкові атоми (рис. 2.3) - можуть або заміщати атоми основного металу - **атоми заміщення**, або впроваджуватись у найбільш вільні місця ґратки аналогічно міжвузловим атомам - **атоми проникнення / втілення**.

Чистий метал, що складається тільки з одного типу атомів, не існує в природі. Домішки або чужорідні атоми завжди будуть присутні, а деякі існуватимуть як точкові дефекти. Більшість металів є сплавами, в яких

домішкові атоми були додані навмисно для надання специфічних характеристик матеріалу.

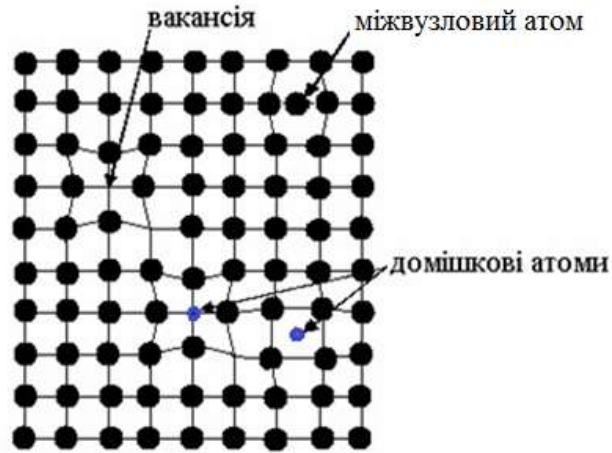


Рис. 2.3. Точкові дефекти кристалічної будови

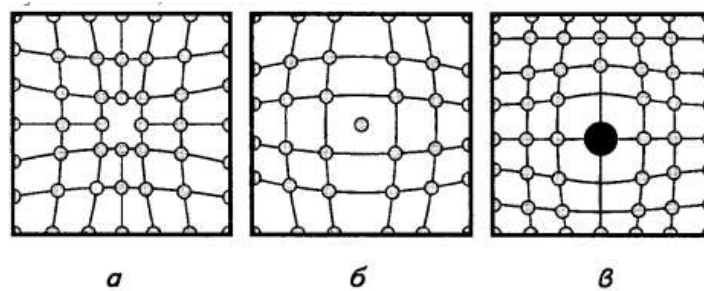


Рис. 2.4. Викривлення кристалічної ґратки біля вакансії (а), міжвузлового (б) і домішкового (в) атомів

Твердим розчином називають фазу, в якій один із компонентів сплаву зберігає свою кристалічну ґратку, а атоми іншого компонента (домішкові атоми) розміщуються у ґратці першого компонента (розчинника), змінюючи його параметри. В залежності від характеру розміщення атома компонента, що розчиняється у ґратці розчинника, розрізняють: тверді розчини заміщення і тверді розчини проникнення.

При утворенні твердого розчину заміщення атоми компонента, що розчиняється, заміщують частину атомів розчинника в його кристалічній ґратці. Тверді розчини заміщення можуть бути як з обмеженою, так і з необмеженою розчинністю.



Лінійні дефекти

Лінійні дефекти мають малі розміри у двох напрямках, що близькі до параметру кристалічної ґратки, і великі - у третьому напрямку. Ці недосконалості називаються дислокаціями. Під дислокаціями розуміють лінійне порушення порядку атомних площин у кристалічній ґратці твердих тіл. В перекладі з грецької це слово означає зміщення.

Дислокації є основними лінійними дефектами. Вперше уявлення про дислокації було використано в 1934 році вченими Орованам і Тейлером при дослідженні пластичної деформації кристалічних матеріалів, з метою пояснення великої різниці між реальною і теоретичною міцністю металу. Як з'ясувалося, всі метали містять значну кількість первинних дислокацій, що утворилися в результаті росту кристалів із розплаву. Вважається, що нерегулярні границі зерна є джерелом утворення дислокацій. Дислокація також може бути сформована шляхом агрегації і зникнення вакансій. Гетерогенне зародження дислокацій можливе від високих локальних напружень на частинках другої фази або в результаті фазового перетворення.

Дислокація – це дефекти кристалічної будови, що являють собою лінії, уздовж і поблизу яких порушено характерне для кристала правильне розташування атомних площин. Більшість дислокацій утворюються шляхом зсувного механізму.

Найпростіші види дислокацій – крайові та гвинтові.

Крайова дислокація (рис. 2.5) являє собою локалізоване викривлення кристалічної ґратки, що викликано наявністю в ній «зайвої» атомної напівплощини - *екстраплощини*. Край екстраплощини являє собою лінію крайової дислокації, довжина якої може досягати багатьох тисяч параметрів кристалічної ґратки. Дислокація вважається позитивною, якщо розміщується у верхній частині кристала і позначається  та негативною, якщо розміщена у нижній частині кристала і позначається .

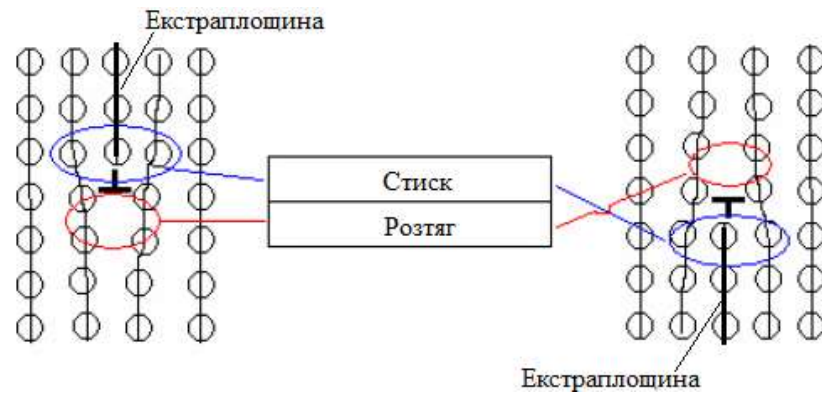


Рис. 2.5. Крайові дислокації

Окрім крайових, розрізняють ще гвинтові дислокації. Утворення гвинтової дислокації стає зрозумілим з рис. 2.6.

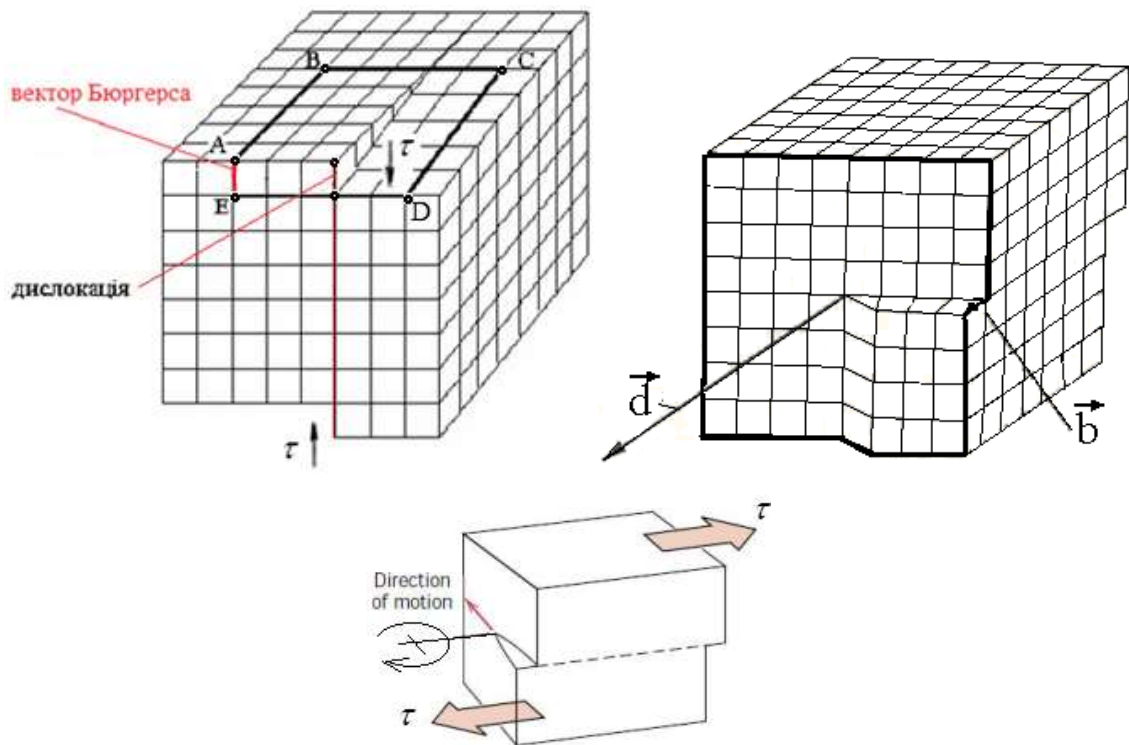


Рис. 2.6. Гвинтова дислокація

У кристалі виникає «надріз» з наступним зсувом однієї частини кристала відносно іншої у напрямку дії зсувного напруження τ . При цьому, у переднього краю (поблизу лінії AD) зсув відбувся на один період ґратки, а при наближенні до лінії BC величина зсуву зменшується аж до повного зникнення. Це призводить до появи на поверхні кристала сходинки - виступу

зсуву. В результаті горизонтальні атомні площини будуть покривлені таким чином, що у переднього краю кристала кожна площина правої частини з'єднується з нижче розташованою площиною лівої частини. Лінія гвинтової дислокації паралельна вектору зсуву τ .

Енергія викривлення кристалічної ґратки є однією з найважливіших характеристик дислокації будь-якого типу. Критерієм цього викривлення служить вектор Бюргерса (позначається символом \vec{b}).

Вектор Бюргерса - це вектор довжиною в одну або декілька основних трансляцій кристалічної решітки, що з'єднує початкову і кінцеву точки контура, вздовж якого можна обійти дислокацію і який був би замкненим у випадку відсутності дислокації.

Для визначення вектора Бюргерса крайової дислокації проведемо навколо дислокації контур ABCDE (рис. 2.7). Контур проводять так, щоб від точки А рівномірно відраховувалась однакова кількість міжатомних відстаней АВ, ВС, CD і DE. Різницю довжини контурів АЕ називають вектором Бюргерса. Лінія крайової дислокації перпендикулярна вектору Бюргерса.

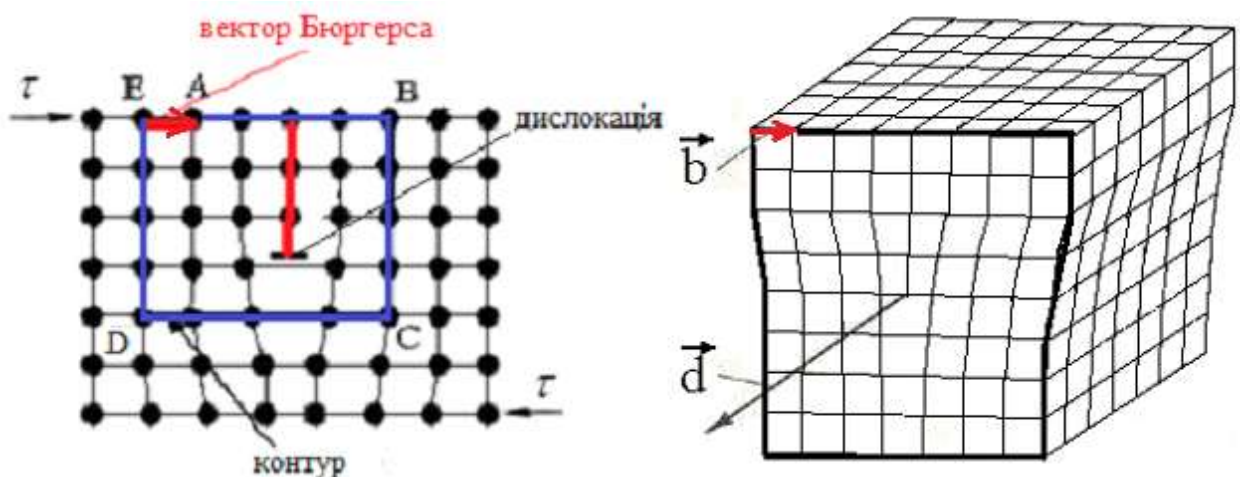


Рис. 2.7. Крайова дислокація: \vec{d} - вектор, напрямлений вздовж дислокації; \vec{b} - вектор Бюргерса

Визначення вектора Бюргерса для кристала, що містить гвинтову дислокацію, роблять аналогічно (рис.2.6). Лінія гвинтової

дислокації паралельна вектору Бюргерса. Якщо вектор Бюргерса охоплює кілька дислокацій, то величина його відповідає геометричній сумі векторів окремих дислокацій. Вектор Бюргерса дозволяє знайти сили, необхідні для просування дислокації, сили взаємодії і енергію дислокацій. Дислокації утворюються в процесі кристалізації металів із групи вакансій, а також у процесі пластичної деформації і фазових перетворень.

На рисунку 2.8 наведено схематичне зображення дислокації, що має змішаний характер, тобто містить як крайову, так і гвинтову дислокації одночасно.

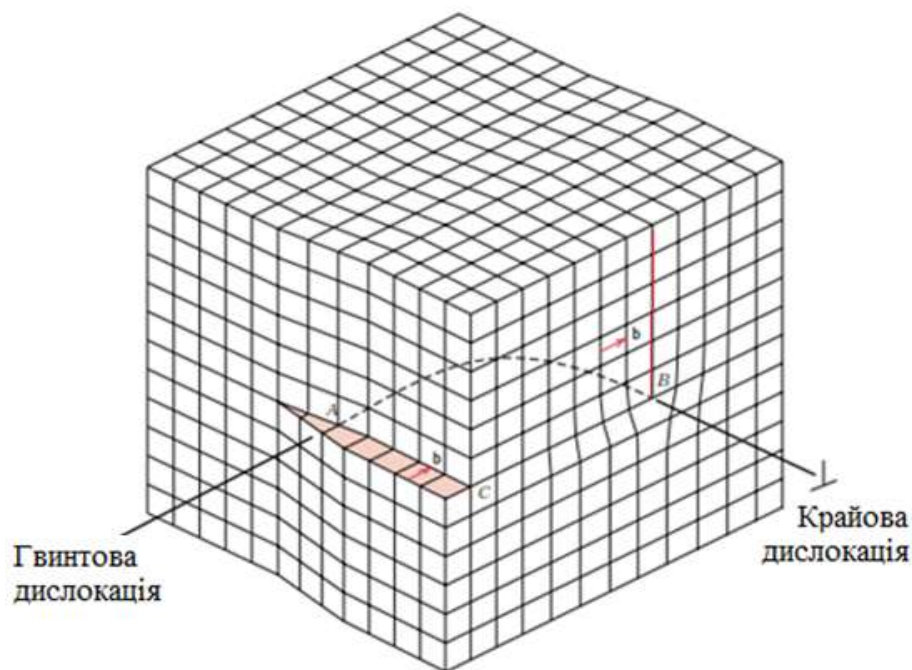


Рис. 2.8. Змішана дислокація

Дислокаційна структура матеріалу характеризується **щільністю дислокацій**, яка визначається як сумарна довжина усіх ліній дислокацій, що містяться в одиниці об'єму. Формула для визначення щільності дислокацій має вигляд:

$$\rho = \frac{\sum l}{V} [\text{см}^{-2}], \quad (1.5)$$

де $\sum l$ - сумарна довжина ліній дислокацій, см; V - об'єм кристала, см³.

У звичайних металах міститься близько 10^6 - 10^8 см⁻² дислокацій. Значні пластичні деформації металу збільшують щільність дислокацій в 10^3 - 10^4 разів. Вплив дефектів кристалічних ґраток на міцність металів наведено на рис. 2.9.

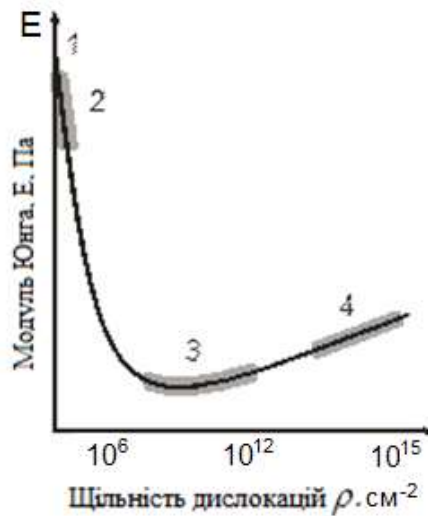


Рис. 2.9. Зміна міцності металів зі збільшенням щільності дислокацій: 1 - теоретична міцність; 2 – міцність монокристалів у вигляді «вусів»; 3 - чисті незміцнені метали; 4 - сплави, що зміцнені легуванням, наклепом і термічною обробкою

Ліва гілка кривої відповідає створенню досконалих бездислокаційних ниткоподібних кристалів, так званих «вусів», міцність яких близька до теоретичної. Спочатку, збільшення числа дислокацій призводить до падіння модуля Юнга, а отже і міцності. Після досягнення мінімуму міцність починає зростати. Це можна пояснити наступним. Із зростанням кількості джерел дислокацій їх щільність збільшується. Крім паралельних дислокацій, виникають дислокації в різних площинах і напрямках. Дислокації впливають одна на одну, їх рух гальмується, відбувається анігіляція - взаємне знищення. З підвищенням щільності дислокацій їх рух стає все більш утрудненим, що вимагає збільшення прикладеного навантаження для подальшої деформації. В результаті метал зміцнюється, що відповідає правій гілці кривої.

Таким чином, підвищення міцності металів і сплавів може бути досягнуто двома шляхами:

- отриманням металів з більш близькою до ідеальної будовою кристалічних ґраток, тобто металів, в яких відсутні дефекти кристалічної будови або ж їх число вкрай мале;
- збільшенням кількості дефектів (структурної недосконалості), що перешкоджають руху дислокацій. Обидва шляхи реалізовані в промисловості.

Поверхневі дефекти

Під поверхневими (двомірними) дефектами розуміють такі порушення у кристалічних ґратках, що мають велику довжину у двох напрямках і в декілька міжатомних відстаней - у третьому напрямку. До них відносяться дефекти пакування (відхилення від регулярності в розташуванні шарів атомів); двійникові границі (симетричний дзеркальний зсув атомних шарів); границі зерен і зовнішні поверхні кристала (рис.2.10).

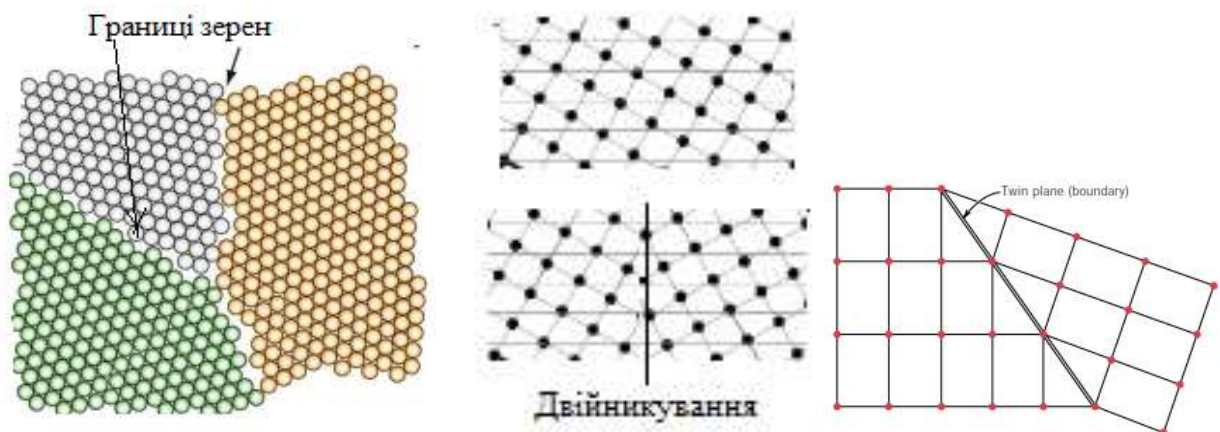


Рис. 2.10. Поверхневі дефекти

Поверхневі дефекти представляють собою пружні спотворення кристалічної решітки по границям зерен або їх фрагментів (блоків мозаїчної структури). Розрізняють великокутові і малокутові границі.

Великокутові границі є областями в декілько періодів кристалічної решітки, упродовж яких решітки однієї кристалографічної орієнтації

переходять в решітки іншої орієнтації. Таку будову мають границі зерен. Розміри зерен складають до 1000 мкм. Кути розорієнтації складають до декількох десятків градусів. Границя між зернами являє собою тонку поверхневу зону (5...10 атомних діаметрів) з максимальним порушенням порядку в розташуванні атомів. Будова перехідного шару сприяє скупченню в ньому дислокацій. На межах зерен підвищена концентрація домішок, що знижують поверхневу енергію. Однак і всередині зерна ніколи не спостерігається ідеальної будови кристалічної решітки. Є ділянки, розорієнтовані один відносно іншого на кілька градусів. Ці ділянки називаються фрагментами. *Процес розподілу зерен на фрагменти називається фрагментацією або полігонізацією.* У свою чергу, кожен фрагмент складається з блоків, розмірами менше 10 мкм, розорієнтованих на кут менше одного градуса. Таку структуру називають блоковою або мозаїчною.

Малокутові границі є ланцюжками дислокацій (дислокаційні стінки), що відділяють одну частину кристалічної решітки від іншої (один блок мозаїчної структури від іншого). Щільність розташування дислокацій залежить від кута між кристалографічними площинами у сусідніх блоках. Чим кут більший (у межах до декількох кутових градусів), тим щільніше розташовані дислокації.

Об'ємні дефекти

До об'ємних (тривимірних) дефектів відносять: скупчення точкових дефектів, що утворюють пори, тріщини, включення іншої речовини; об'ємні угруповання дефектів меншої мірності; напружені області навколо дефектів меншої мірності та ін.

Іншим типом об'ємних дефектів у кристалах є *кластери*. Традиційний термін «кластер» означає групу атомів у кристалі, які утворюють мікрообласть, у межах якої виконується операція трансляційної симетрії для всіх елементів

кластера. У сучасній фізиці це поняття розширене і під кластером розуміють певне впорядковане розміщення атомів, в якому є ближній порядок. Кластери можуть бути виявлені як у кристалі, так і самотійно, виступаючи будівельним матеріалом для нових сполук.

З середини 80-х років ХХ ст. розпочалося інтенсивне дослідження багатоатомних кластерів вуглецю C_n - фулеритів, де n - число атомів. У фулеритах атоми вуглецю знаходяться на замкнутій (сферичній чи сфероїдальній) поверхні макромолекули. На початку 90-х років була розроблена технологія створення фулеритів, яка ґрунтується на термічному розпиленні графітових електродів у дуговому розряді. Це дало змогу отримувати фулерити та вивчати їхні властивості не тільки у молекулярній формі, але й синтезувати з них нові кристалічні матеріали, які називають *фулеренами*. Дослідження показали, що **фулерени та фулерити** мають унікальні властивості. Дослідження електричних і магнітних властивостей фулеренів, легованих лужними металами, зумовило відкриття в них явища надпровідності. Згодом була виявлена здатність фулеренів утворювати трубчасті волокна - **нанотрубки**, які є надзвичайно стійкими щодо хімічної дії і є тоншими та міцнішими за інші відомі волокна. Залежно від геометричних параметрів такі нанотрубки можуть мати одночасно властивості металу, напівпровідника чи діелектрика.

Широкий спектр властивостей фулеренів робить їх перспективними для практичного використання. Зокрема, в мікроелектроніці гетерофулерити розглядають як основу для нових напівпровідникових матеріалів та фотоелектронних приладів. У медицині фулерити відіграють роль сорбентів, а нанотрубки, які вони утворюють, розглядають як засіб транспортування лікарських препаратів прямо у клітину. В техніці фулерити використовують як основу для синтезу штучних алмазів, їх також застосовують як домішки для мастильних речовин, як іонні вловлювачі радіоактивних елементів, а на основі розчинів фулеритів створені нелінійні оптичні затвори.

Таким чином, наявність дефектів викликає численні зміни у фізичних властивостях кристала. Вміння закономірно розподіляти дефекти по об'єму кристала дозволяє створювати в одному зразку області з різними типами провідності, що є основою при виготовленні різноманітних напівпровідникових приладів.

Пластична деформація полікристала

Пластична деформація полікристала при впливі на нього дотичних напружень відбувається по двом основним механізмам - шляхом ковзання дислокацій (рис.2.11) і шляхом двійникування (рис.2.12).

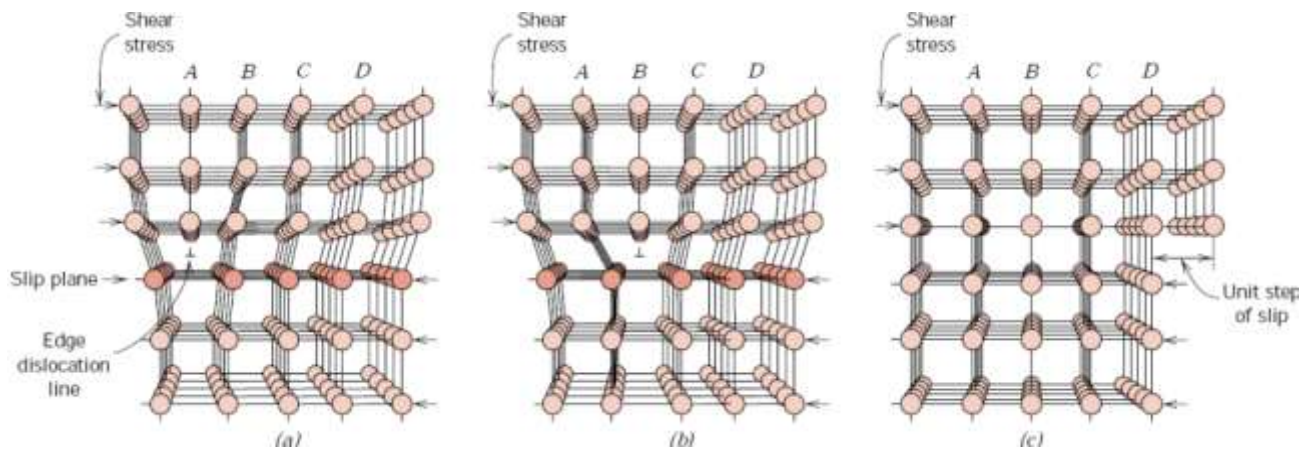


Рис 2.11. Механізм ковзання

Ковзання - це переміщення однієї частини кристала щодо іншої, що здійснюється шляхом послідовного естафетного переміщення дислокацій, при якому кристалічна будова обох частин залишається незмінною. При цьому, ковзання не йде одночасно по всіх кристалографічних площинах і напрямкам. *Спочатку у процес ковзання вступають ті площини й напрямки, які найбільше сприятливо орієнтовані щодо напрямку максимальних дотичних напружень зовнішньої сили й у яких дотичні напруження послідовно зростають до певної критичної величини. Площини ковзання орієнтовані паралельно щільно упакованим кристалографічним площинам.* Далі в роботу включаються кристаліти менш сприятливо орієнтовані відносно напрямків дії

максимальних дотичних напружень. В результаті деформації відбувається розворот зерен, зміна їхньої орієнтації у просторі й поступове їхнє залучення у пластичну деформацію. Структура стає нерівноважною. При одному й тому ж об'ємі поверхня зерна збільшується, кристаліти набувають витягнутої форми. Виникає текстурованість. Така структура підвищує показники міцності та твердість металу.

Двійникування – перехід однієї частини кристала в положення, симетричне іншій частині. При ковзанні найменший зсув рівний періоду кристалічної решітки, а при двійникування - частці періоду. При ковзанні перехід решітки в нове положення відбувається поступово, при двійникування - майже миттєво, тобто ковзання відбувається при статичному навантаженні, а двійникування при ударі. Після цього деформована частина решітки стає дзеркальним відображенням недеформованої частини.

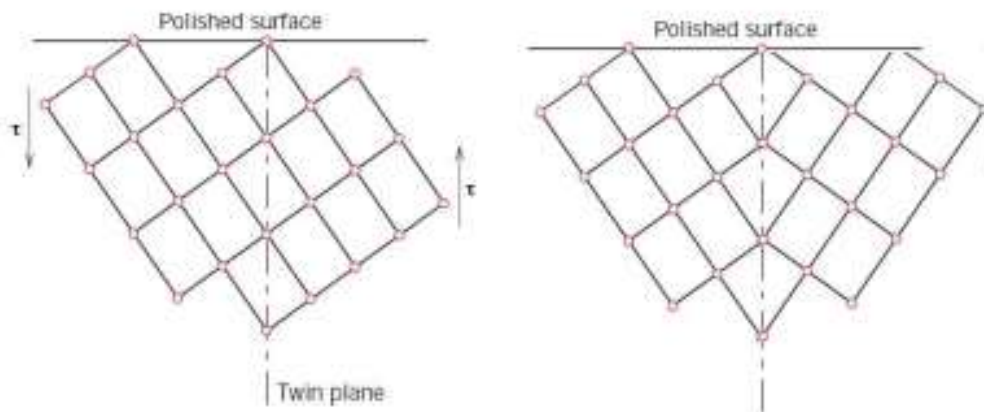


Рис 2.12. Механізм двійникування

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Наведіть приклади простих і складних точкових дефектів.
2. Поясніть механізм утворення вакансій за Шоттки та механізм утворення вакансії та міжвузлового атома за Френкелем.
3. Запишіть співвідношення Больцмана для рівноважної концентрації вакансій у кристалі.
4. Дайте визначення твердому розчину.
5. Чим відрізняється твердий розчин заміщення від твердого розчину проникнення?
6. Дайте визначення дислокації та назвіть найпростіші види дислокацій.
7. Як визначають густину дислокацій?
8. Визначте загальну довжину дислокацій в 1000 мм^3 матеріалу при щільності дислокацій 10^5 мм^{-2} ($10^5 \text{ мм}^{-2} \cdot 1000 \text{ мм}^3 = 10^8 \text{ мм} = 10^5 \text{ м}$)
9. В чому різниця між позитивною та негативною крайовими дислокаціями?
10. Як будуються контури Бюргерса та визначаються вектори Бюргерса для крайової та гвинтової дислокацій?
11. Що характеризує вектор Бюргерса дислокації та як він записується?
12. Поясніть вплив щільності дислокацій на міцність металу.
13. Наведіть приклади тривимірних дефектів.
14. Які дефекти називають динамічними?
15. Опишіть механізми пластичної деформації (ковзання і двійникування) кристалічних матеріалів під дією дотичних напружень

ЛЕКЦІЯ 3

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Поняття про деформації

Під деформаціями розуміють будь-які зміни розмірів або форми тіла. При деформації відбувається зміна взаємного положення часток тіла, пов'язана з їх переміщенням один відносно одного. Деформація є результатом зміни міжатомних відстаней і перегрупування блоків атомів. Розрізняють пружні та пластичні деформації.

Пружні – це деформації, які зникають при розвантаженні тіла. Пластичні – такі, що залишаються після розвантаження.

При пружних деформаціях зміщення атомів від положення рівноваги оборотні, іншими словами, атоми не виходять за межі міжатомних зв'язків. При пластичних деформаціях переміщення атомів відбуваються на значні відстані від початкових положень рівноваги, стаючи необоротними, тобто спостерігається вихід за рамки міжатомних зв'язків і після зняття навантаження відбувається переорієнтація в нове рівноважне положення.

Деформація твердого тіла може бути наслідком: дії зовнішніх сил; фазових перетворень, пов'язаних зі зміною об'єму; теплового розширення; намагнічення (магнітострикція); появи електричного заряду (п'єзоелектричний ефект).

При навантаженні твердого тіла в ньому виникають внутрішні сили взаємодії між частками, які протидіють зовнішнім силам, прагнучим повернути частки тіла в положення, яке ті займали до деформації. Ці внутрішні сили називаються силами пружності.

Якщо зовнішні сили не перевищують деякої величини, званої межею пружності твердого тіла, то виникаючі деформації будуть пружними.

Пружність – здатність тіл відновлювати свою форму та розміри при розвантаженні.

Основні визначення

Пружність – здатність тіл відновлювати розміри (форму чи об’єм) після зняття навантажень.

Жорсткість – здатність матеріалу протидіяти зовнішнім навантаженням.

Міцність – здатність тіл протидіяти руйнуванню під дією зовнішніх сил.

Стійкість – здатність тіл протидіяти зовнішнім силам, зберігаючи первісну форму пружної рівноваги.

Пластичність – здатність тіл зберігати (повністю або частково) зміну розмірів після зняття навантажень.

Крихкість – здатність матеріалу руйнуватися без утворення помітних залишкових деформацій.

Текучість – властивість середовища, що характеризує здатність окремих його шарів переміщуватись з деякою швидкістю у просторі відносно інших шарів цього середовища.

Розтяг-стиск

Деформація розтягу-стиску виникає, коли до стержня з початковою довжиною l_0 уздовж його осі прикладені протилежно спрямовані сили F (рис. 3.1). При цьому відбувається переміщення перерізів уздовж осі стержня, який при розтягуванні видовжується на величину Δl , а при стискуванні коротшає на Δl .

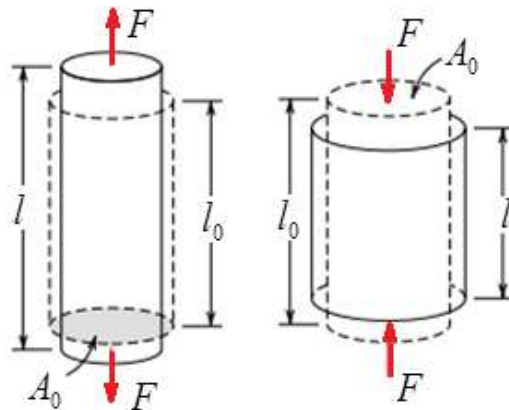


Рис. 3.1

Величина Δl називається абсолютною поздовжньою деформацією. Відносна поздовжня деформація (далі - деформація) дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} . \quad (3.1)$$

При пружній деформації осевого розтягу-стиску, має місце залежність, яку називають *законом Гука*:

$$F = k\Delta x,$$

де k - коефіцієнт жорсткості пружного тіла залежить як від властивостей матеріалу, так і від розмірів пружного тіла.

Закон Гука для пружного стержня, після ряду перетворень, можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} F = k\Delta x = k(l - l_0) = k\Delta l; \quad F = \sigma A_0 = k\Delta l; \\ \sigma = \frac{k\Delta l}{A_0} = \frac{k\Delta l}{A_0} \cdot \frac{l_0}{l_0} = \frac{kl_0}{A_0} \varepsilon; \quad \frac{kl_0}{A_0} = E; \\ \sigma = E\varepsilon, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де σ – нормальне напруження, Н/м² (Па);

A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка;

E – коефіцієнт пропорційності, званий модулем поздовжньої пружності, або модулем пружності першого роду, або модулем Юнга, Н/м² (Па) .

Модуль Юнга E , на відміну від коефіцієнта жорсткості k , залежить тільки від властивостей матеріалу. Для однорідного та ізотропного матеріалу $E = const$.

Розтяг або стиск супроводжуються зміною поперечних розмірів. Відношення відносної поперечної деформації до відносної поздовжньої деформації за абсолютною величиною, в межах дії закону Гука, називається коефіцієнтом Пуассона μ . Для різних матеріалів *коефіцієнтом Пуассона* знаходиться в межах $0 \leq \mu \leq 0,5$.

$$\varepsilon_{\text{нопер}} = \frac{\Delta d}{d_0} = -\mu \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \varepsilon_{\text{нопер}} = -\mu \varepsilon_{\text{позд}}; \quad \mu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{нопер}}}{\varepsilon_{\text{позд}}} \right|. \quad (3.3)$$

Деформоване тіло має запас потенційної енергії, яка називається пружною енергією, і може здійснювати роботу. Пружна енергія дорівнює роботі сил, що витрачені на деформацію тіла, за умови, що його кінетична енергія не змінюється.

Потенційна енергія розтягнутого стержня визначається за формулою:

$$U = \frac{F \Delta l}{2}. \quad (3.4)$$

Питома потенційна енергія пружної деформації (щільність потенційної енергії):

$$u = \frac{U}{V_0} = \frac{F \Delta l}{2V_0} = \frac{F \Delta l}{2A_0 l_0} = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma = \frac{1}{2} \varepsilon^2 E = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (3.5)$$

де V_0 – початковий об'єм стержня.

Випробування зразків на розтяг

Механічні властивості металів характеризують їх поведінку під дією зовнішніх навантажень. Вони визначаються експериментально з використанням стандартних методик і, у більшості випадків, стандартних зразків. В залежності від умов навантаження механічні властивості можуть визначатися при:

- статичному навантажуванні, коли навантаження збільшується повільно та плавно;
- динамічному навантажуванні, коли навантаження збільшується з великою швидкістю - має ударний характер;
- повторно-змінному чи циклічному навантажуванні, коли навантаження в процесі випробування багаторазово змінюється за величиною та напрямком.

Статичні випробування на розтяг здійснюють на спеціальних розривних машинах, які записують робочу діаграму розтягу - залежність абсолютної поздовжньої деформації Δl зразка від діючого на нього навантаження F .

Для випробувань виготовляють зразки циліндричної форми круглого або прямокутного перерізу (рис. 3.2).

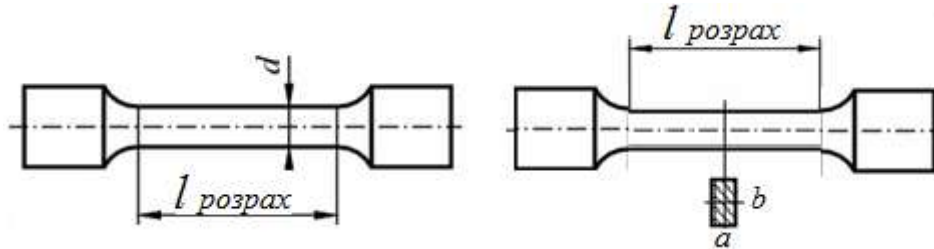


Рис. 3.2

Циліндричні зразки можуть бути нормальні з розрахунковою довжиною $10d$ і укорочені з довжиною $5d$.

Для зразків прямокутного перерізу $a \times b$, при обчисленні розрахункової довжини, використовують діаметр кола, рівновеликого поперечному перерізу робочої частини зразка:

$$ab = \frac{\pi d^2}{4}; \quad d = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}}. \quad (3.6)$$

Для типового конструкційного матеріалу, такого як нержавіюча сталь, робоча діаграма має наступний вигляд (рис. 3.3):

Розглянемо основні ділянки робочої діаграми.

Ділянка ОА – пряма лінія. На цій ділянці спостерігається лінійна залежність між навантаженням і видовженням Δl , тобто виконується закон Гука.

У точці В, яка майже співпадає з т. А, практично не спостерігається залишкових деформацій. Механізм пружної деформації – зміна відстані між атомами.

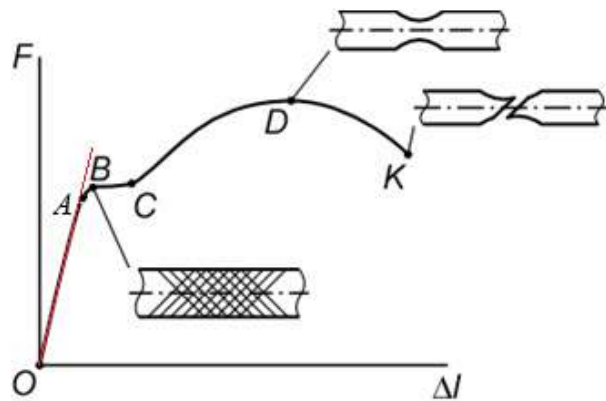


Рис. 3.3

Ділянка BC – площадка загальної текучості. Деформування на ділянці BC не викликає зростання навантаження. Саме на цій ділянці на поверхні зразка з'являється сітка ліній, напрямлених під кутом 45° до осі розтягу (лінії Чернова-Людерса). Це свідчить про появу нового механізму деформації – зсуву атомних шарів відносно один одного. В результаті цих зсувів, при знятті навантажень, зразок не відновлює початкову конфігурацію, а набуває залишкової (пластичної) деформації, яка супроводжується нагрівом, акустичним випромінюванням, зміною електропровідності та магнітних властивостей конструкційного матеріалу.

Ділянка CD – ділянка тимчасового зміцнення, де матеріал знов починає чинити опір силам, що його деформують.

В точці D починається руйнування матеріалу, на зразку утворюється «шийка» – місцеве звуження. Утворення шийки характерно для пластичних металів, які мають діаграму з максимумом. Подальша деформація локалізується в цій області, і за рахунок зменшення площі поперечного перерізу необхідна для розтягу сила знижується.

У точці K зразок повністю руйнується – розділяється на дві частини.

Вид робочої діаграми залежить від геометричних розмірів зразка. Для усунення впливу геометричних розмірів зразка, робоча діаграма трансформується в умовну в координатах: напруження σ – деформація ε (рис. 3.4).

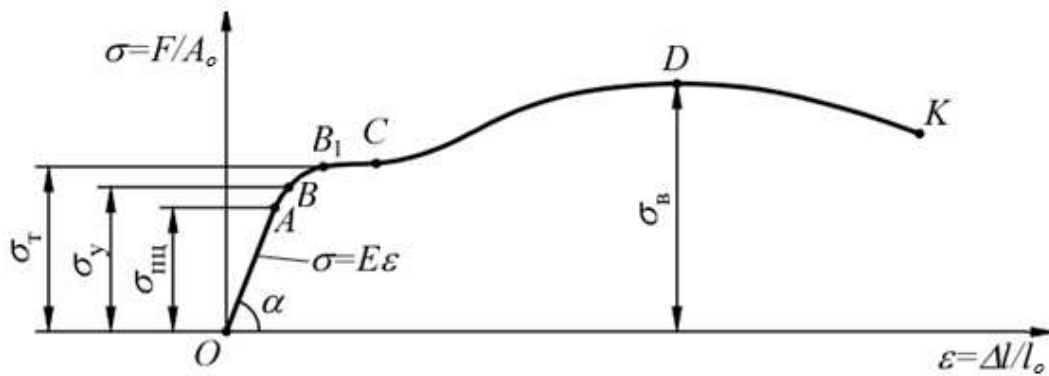


Рис. 3.4

Отримана діаграма називається умовною тому, що при обчисленні напруження і деформації, сила і подовження відносяться не до дійсних, а до початкових значень площі поперечного перерізу та довжини зразка.

На умовній діаграмі виділяють наступні характерні точки:

$\sigma_{ПЦ}$ – межа пропорційності (т. А) – максимальне напруження, до якого справедливий закон Гука, тобто спостерігається пряма пропорційна залежність між напруженням і деформацією;

σ_Y – межа пружності (т. В) – максимальне напруження, до якого в матеріалі не виникає пластичної деформації (на практиці за межу / границю пружності приймають напруження, при якому залишкова деформація становить 0,05% від початкової довжини зразка і цей параметр позначають символом $\sigma_{0,05}$;

σ_T – межа текучості (т. В₁) – напруження, при якому спостерігається зростання деформації при постійному напруженні;

σ_B – **межа міцності або тимчасовий опір** розриву (т. D) – максимальне напруження, яке може витримати зразок без руйнування.

За межами ділянки пружності, у будь-якій точці діаграми, наприклад т. G (рис. 3.5), повна деформація $\varepsilon_{ПОВН}$ складається з пружної $\varepsilon_{ПР}$ і пластичною $\varepsilon_{ПЛ}$ складових, тобто:

$$\varepsilon_{ПОВН} = \varepsilon_{ПР} + \varepsilon_{ПЛ} \quad (3.7)$$

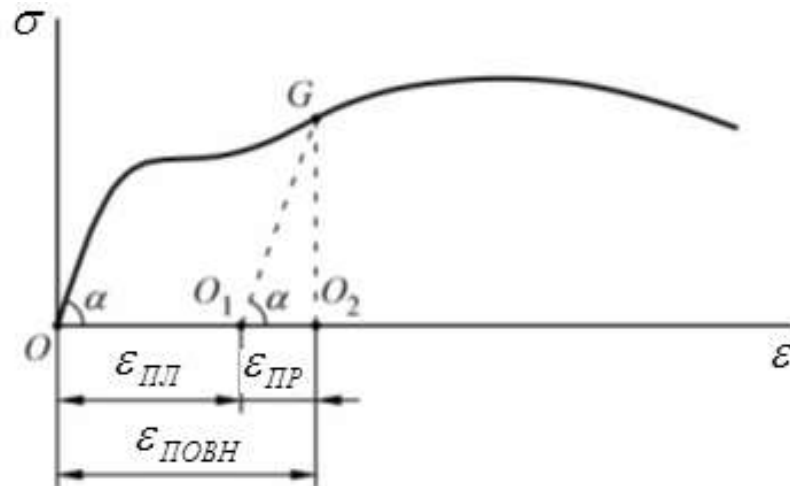


Рис. 3.5

Якщо зняти навантаження в точці G , то розвантаження здійснюватиметься за законом Гука, тобто вздовж лінії GO_1 , що паралельна ділянці пропорційності. Таким чином, відрізок OO_1 відображає величину пластичної деформації зразка $\varepsilon_{ПЛ}$, а відрізок O_1O_2 – пружної деформації $\varepsilon_{ПР}$ на момент розвантаження.

Характеристики пружності

1. Межа пропорційності $\sigma_{ПЦ}$.
2. Межа пружності σ_y .
3. Модуль Юнга (модуль пружності першого роду) – характеризує пружні властивості матеріалу і дорівнює тангенсу кута між прямою OA і горизонтальною віссю деформації (рис. 4).
4. Коефіцієнт Пуассона. Для основних марок сталі $\mu = 0,25 \dots 0,35$; найменше значення коефіцієнта Пуассона у берилія (0,039), найбільше – у свинця (0,44), телура та індія (0,46).

В межах дії закону Гука $\mu = const$.

Характеристики міцності

Міцність – це здатність металів чинити опір пластичній деформації і руйнуванню під дією навантажень. Основними параметрами, які характеризують міцність металів, є

1. Межа текучості σ_T .
2. Межа міцності σ_B .

Якщо діаграма розтягу не має площадки текучості (рис. 3.6), то вводять умовну межу текучості $\sigma_{0,2}$ – напруження, що відповідає залишковій деформації 0,2 %. Для деяких матеріалів величину умовної межі текучості визначають при залишковій деформації 0,5 % ($\sigma_{0,5}$).

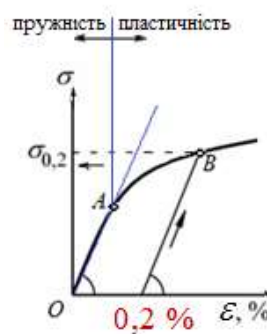


Рис. 3.6

Характеристики пластичності

Пластичність характеризується відносним видовженням δ (поздовжня деформація в момент розриву) і відносним звуженням ψ (поперечна відносна деформація в момент розриву):

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0}; \quad (3.8)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_K}{A_0}, \quad (3.9)$$

де: l_0 і A_0 - початкові довжина і площа поперечного перерізу зразка;

l_K і A_K - кінцева довжина і площа поперечного перерізу зразка.

Відносне видовження δ при розриві можна визначити безпосередньо по умовній діаграмі розтягу (рис. 3.7), провівши з точки розриву К перпендикуляр КМ до осі деформацій.

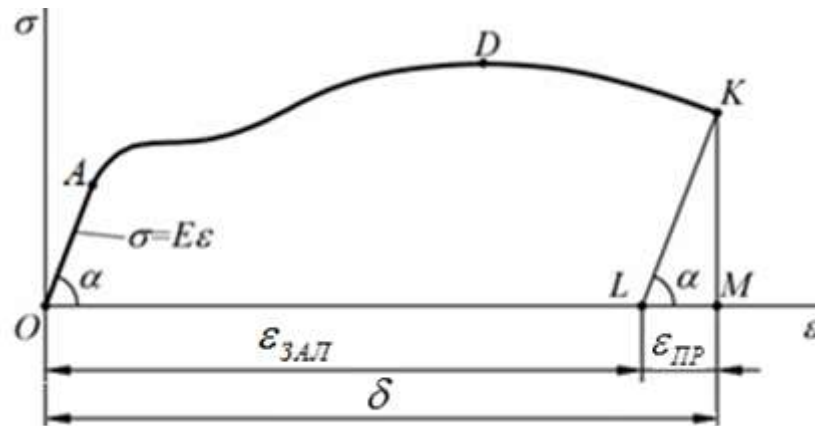


Рис. 3.7

Пластичні та крихкі матеріали

Матеріали прийнято поділяти на пластичні та крихкі (рис. 3.8).

Пластичні – це такі, що руйнуються при значних залишкових деформаціях $\varepsilon_{ЗАЛ} \approx (8 \div 28) \%$.

Крихкі – руйнуються при малих величинах залишкових деформацій $\varepsilon_{ЗАЛ} \leq 2 \%$. При цьому, випробовування матеріалів проводять при кімнатній температурі та нормальному атмосферному тиску.

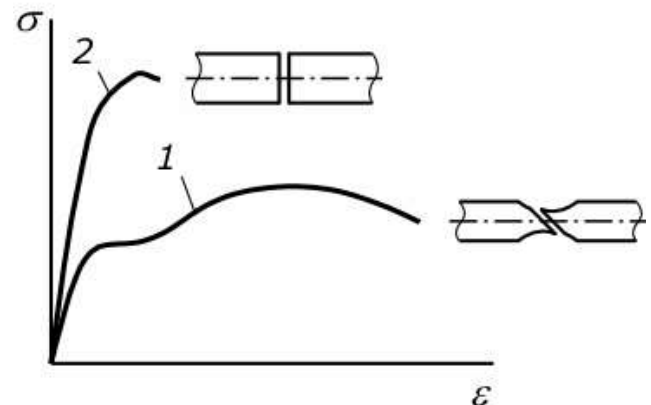


Рис. 3.8. Пластичні (1) та крихкі (2) матеріалт

Пластичні та крихкі матеріали відрізняються за характером руйнування.

У пластичних матеріалах перед розривом утворюється шийка (рис. 3.8, крива 1), руйнування здійснюється під кутом $\approx 45^\circ$ до осі розтягу. Межа

тежкості при розтягу і при стиску приблизно рівні між собою: $\sigma_{T_{\text{розтяг}}} \approx \sigma_{T_{\text{стиск}}}$. Пластичні матеріали при випробуванні на стиск не руйнуються, а сплющуються у тонкий диск. Саме по цій причині пластичні матеріали на стиск, як правило, не випробовуються.

Руйнування *крихких матеріалів* здійснюється по площині, нормальній до осі розтягу, як правило, без утворення шийки (рис. 8, крива 2). Діаграми випробувань на розтяг і стиск подібні одна одній. Крихкі матеріали при випробуванні на стиск руйнуються, при цьому, межа міцності при розтягу нижча ніж при стиску: $\sigma_{B_{\text{розтяг}}} < \sigma_{B_{\text{стиск}}}$. Тобто, крихкі матеріали опираються краще стиску, ніж розтягу, і для них допустимі напруження на стиск вище ніж на розтяг $[\sigma]_{\text{стиск}} > [\sigma]_{\text{розтяг}}$.

Основна різниця між крихкими та пластичними матеріалами полягає в тому, що крихкі матеріали руйнуються при досить малих деформаціях. У зв'язку з цим, площі під діаграмами для пластичних матеріалів значно більші, ніж для крихких. Тобто, для руйнування пластичних матеріалів треба затратити значно більшу роботу, ніж для руйнування крихких матеріалів. Крім того, крихкі матеріали значно гірше чинять опір розтягу й ударам і досить чутливі до місцевих напружень (концентраторів напружень). **Вироби, зроблені з крихких матеріалів, не здатні до зміни форми.** Пластичні матеріали не мають цих недоліків.

Допустимі напруження

Тверді матеріали повинні задовольняти умовам міцності та жорсткості, тобто під дією прикладених навантажень вони не повинні руйнуватися і виходити за межі допустимих деформацій.

У пластичних матеріалах при $\sigma > \sigma_T$ виникають значні залишкові деформації; у крихких матеріалах залишкові деформації незначні і при $\sigma > \sigma_y$ відбувається руйнування.

Небезпечним напруженням для пластичних матеріалів є межа текучості σ_T (або $\sigma_{0,2}$), а для крихких - межа міцності σ_B (тимчасовий опір). Напруження σ_T, σ_B , не можуть бути прийняті за допустимі. Їх слід зменшити настільки, щоб в експлуатаційних умовах діюче напруження завжди було менше цих напружень. Таким чином, допустимі напруження, можуть бути визначені за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma^{HB}}{n}, \quad (3.10)$$

де σ^{HB} – небезпечне напруження (σ_T або σ_B);

n – коефіцієнт запасу міцності, який показує во скільки разів допустиме напруження менше небезпечного.

Значення коефіцієнту запасу міцності залежить від багатьох факторів, з яких основними є:

- стан матеріалу (крихке або пластичне);
- характер навантаження (статичне, динамічне або повторно-змінне);
- неоднорідність матеріалу (анізотропія механічних властивостей).

Для пластичних матеріалів при статичному навантаженні:

$$[\sigma]_{пл} = \frac{\sigma^{HB}}{n} = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (3.11)$$

де n_T – коефіцієнт запасу по текучості, $n_T = 1,4 \dots 1,6$.

Для крихких матеріалів при статичному навантаженні:

$$[\sigma]_{кр} = \frac{\sigma^{HB}}{n} = \frac{\sigma_B}{n_B}, \quad (3.12)$$

де n_B – коефіцієнт запасу по міцності, $n_B = 2,5 \dots 3,0$.

Від правильного вибору допустимих напружень залежить надійність і економічність конструкції. Значення допустимих напружень і коефіцієнтів запасу встановлюються спеціальними нормами і правилами.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Охарактеризувати основні ділянки робочої діаграми розтягу.
2. Пояснити механізм виникнення ліній Чернова-Людєрса, на якій ділянці діаграми вони виникають.
3. Проаналізувати робочу і умовну діаграми розтягу, охарактеризувати кожену точку діаграми.
4. Пояснити метод визначення пружних властивостей матеріалів по умовній діаграмі розтягу.
5. Пояснити метод визначення характеристик матеріалів на міцність по умовній діаграмі розтягу.
6. Умовна межа текучості і методи її визначення.
7. Пояснити метод визначення залишкової деформації при розтягу по умовній діаграмі.
8. Дати характеристику пластичним і крихким матеріалам, їх особливості та істотні відмінності при випробуваннях на розтяг і стиск.
9. Пояснити метод визначення енергетичних характеристик по умовній діаграмі розтягу.
10. Допустиме напруження для пластичних і крихких матеріалів.

ЛЕКЦІЯ 4

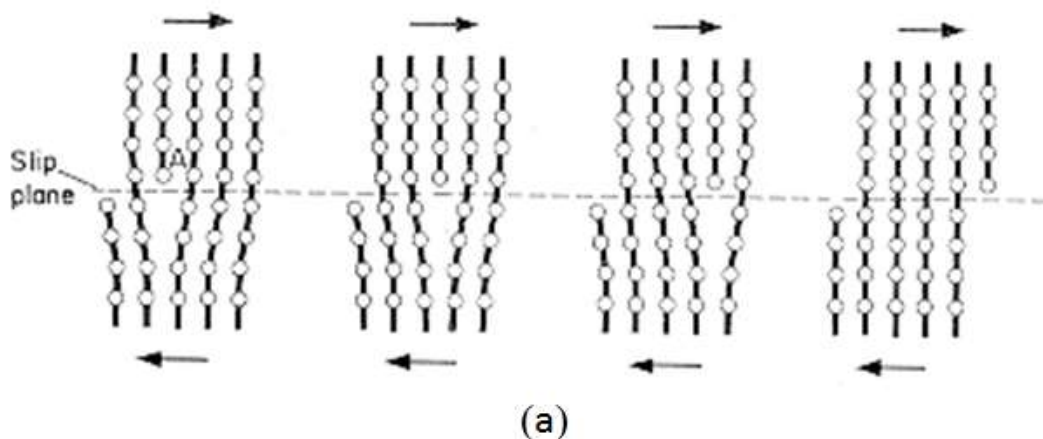
ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ І МЕХАНІЗМИ ЗМІЦНЕННЯ

Деформацією називається зміна форм і розмірів тіла під дією напружень. Деформація, що виникає в результаті порівняно невеликих напружень і зникає після зняття навантаження, називається пружною, а та що залишається – залишковою або пластичною.

Пружна і пластична деформації за фізичною сутністю принципово відрізняються. При пружній деформації відбувається зворотний зсув атомів з положення рівноваги в кристалічній ґратці. Пружна деформація не викликає помітних залишкових змін у структурі і властивостях металу. Після зняття навантаження атоми, які змістилися повертаються у початкове рівноважне положення і кристали набувають первинну форму і розміри. Пружні властивості матеріалів визначаються силами міжатомної взаємодії.

В основі пластичного деформування металів лежить переміщення дислокації. Сутність пластичного деформування - зсув, в результаті якого одна частина кристала зміщується відносно іншої. Існують два різновиди зсуву: ковзання (рис. 4.1, а) і двійникування (рис.4.1, б).

Площина ковзання разом з напрямком ковзання, що належить цій площини, утворить систему ковзання. Ковзання починається під дією зсувного (дотичного) напруження, коли його величина перевищує певне критичне напруження зсуву.



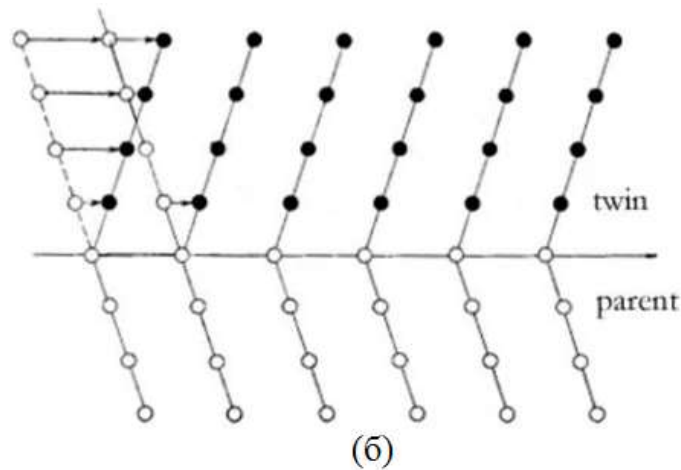


Рис. 4.1. Схематичне зображення механізмів ковзання та двійникування у металах під час пластичної деформації: (а) - рух атомів ковзанням (естафетний механізм розриву та відновлення міжатомних зв'язків); (б) - рух атомів шляхом двійникування

Деформація ковзанням відбувається по площинам і напрямкам, на яких щільність атомів максимальна. Наприклад, у решітці ГЦК такими площинами є $\{111\}$, у ОЦК - $\{110\}$. Фігурними дужками позначається сукупність площин з однаковою атомною будовою (рис. 4.2). Так, сукупність площин $\{110\}$ для ОЦК ґратки включає еквівалентні площини (110) , $(1\bar{1}0)$, $(\bar{1}01)$.

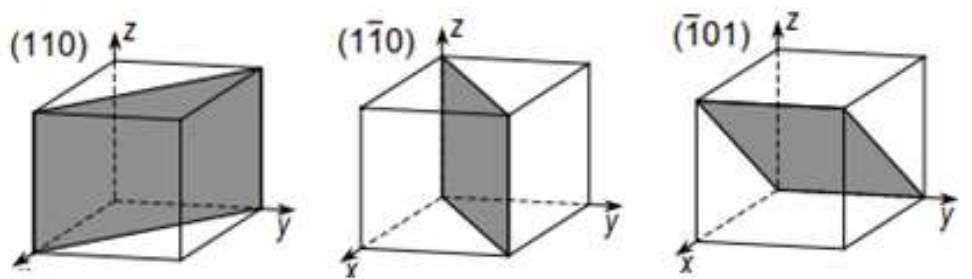


Рис. 4.2

В металах з ГЦК ґраткою (γ -залізо, нікель, мідь, алюміній тощо) системою ковзання, наприклад, є система $(11\bar{1})[011]$; з ОЦК ґраткою (α - залізо, хром, вольфрам, молібден тощо) - система $(110)[\bar{1}11]$.

Через те, що метали з гексагональною щільнопакованою ґраткою мають найменшу кількість систем зсуву, вони менш пластичні і тому важче піддаються деформації, ніж метали з ГЦК та ОЦК ґратками.

В реальних кристалах дотичні напруження, що необхідні для зсуву, в 100...1000 разів менші за розрахункові (теоретичні), що зумовлено присутністю великої кількості дислокацій, які полегшують зсув.

Дислокації - лінійні дефекти кристалічної будови, що виникають при кристалізації і завжди існують в кристалах. Їх наявність значно спотворює кристалічну ґратку та зменшує рівень дотичних напружень, необхідних для зсуву, за рахунок реалізації **естафетного механізму розриву та відновлення міжатомних зв'язків**.

При великій кількості дислокацій можливе їх перетинання, утворення порогів, що зменшує рухливість та потребує для їх переміщення більших напружень, внаслідок чого метал зміцнюється. Кількісною характеристикою дислокацій є густина - сумарна довжина дислокаційних ліній L в одиниці об'єму V ($\rho = \sum L / V$, см⁻²).

Як і ковзання, двійникування здійснюється за рахунок зсуву (рис. 4.3), проте в цьому випадку відбувається зсув однієї частини кристала в положення, відповідне дзеркальному відображенню другої частини. При деформації двійникуванням напруження зсуву вище, ніж при ковзанні. Двійники, як правило, виникають тоді, коли ковзання по тим чи іншим причинам ускладнено.

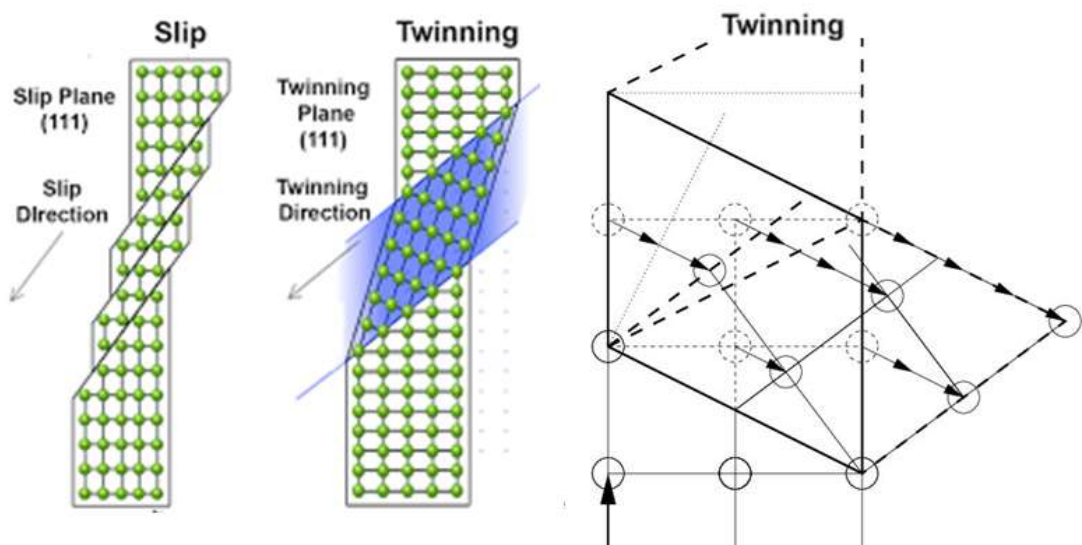


Рис 4.3. Механізм ковзання і двійникування

Холодна пластична деформація монокристалів

При холодній пластичній деформації монокристалів в різних кристалографічних напрямках, отримують різні криві напруження-деформація. Наприклад, межа текучості кристалів цинку, в залежності від орієнтації осі розтягу, може змінюватися в 6 і навіть більше разів, а максимальне видовження змінюється від декількох відсотків до декількох сотень відсотків. Результати випробувань на розтяг відображають зміни пластичних властивостей кристалів в залежності від кристалографічного напрямку.

При всіх випробуваннях має місце зсувна деформація, і тому реєстроване напруження текучості σ_T доцільно співставляти з напруженням, що діє вздовж напрямку зсуву в площині ковзання.

Ковзання в кристалах відбувається по найбільш щільноупакованих площинах у найбільш щільноупакованих напрямках. Площина з напрямком утворюють систему ковзання.

На рисунку показаний кристал з площиною ковзання A_S і площею поперечного перерізу A , який піддається осьовому розтягу силою F , що створює нормальне напруження $\sigma = F / A$;

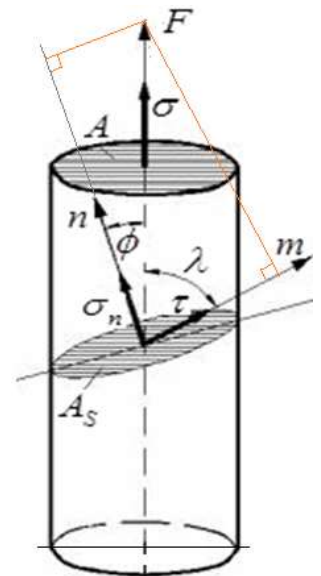
ϕ - кут між віссю розтягу та нормаллю n до площини ковзання A_S ;

λ - кут між віссю розтягу та напрямком ковзання m , вздовж якого здійснюється зсув.

Розкладемо силу F на дві складові: нормальну F_n до площини ковзання і зсувну F_s , що лежить у площині ковзання.

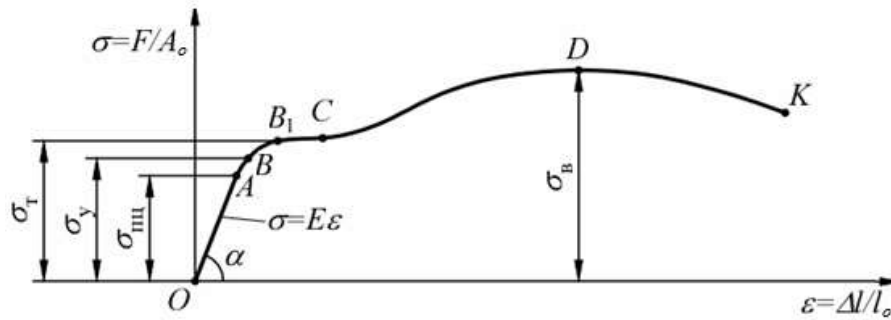
Нормальне напруження на площині ковзання дорівнює:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_S} = \frac{F \cos \phi}{\frac{A}{\cos \phi}} = \frac{F}{A} \cos^2 \phi = \sigma \cos^2 \phi.$$



Напруження зсуву τ на площині ковзання у напрямку ковзання m визначимо з рівняння:

$$\tau = \frac{F_S}{A_S} = \frac{F \cos \lambda}{A} = \frac{F}{A} \cos \lambda \cos \phi = \sigma \cos \lambda \cos \phi .$$



При $\sigma = \sigma_T$:

$$\tau_{KP} = \sigma_T \cos \lambda \cos \phi . \tag{4.1}$$

Згідно з рівнянням (4.1), кристали певного металу починають пластично деформуватися, коли зсувне напруження в площині ковзання у напрямку ковзання досягає певної критичної величини (закон критичних зсувних напружень /закон Шміда).

Величина $(\cos \lambda \cos \phi)$ називається фактором кристалографічної орієнтації або фактором Шміда (Schmid Factor). Активна система ковзання має максимальний фактор Шміда.

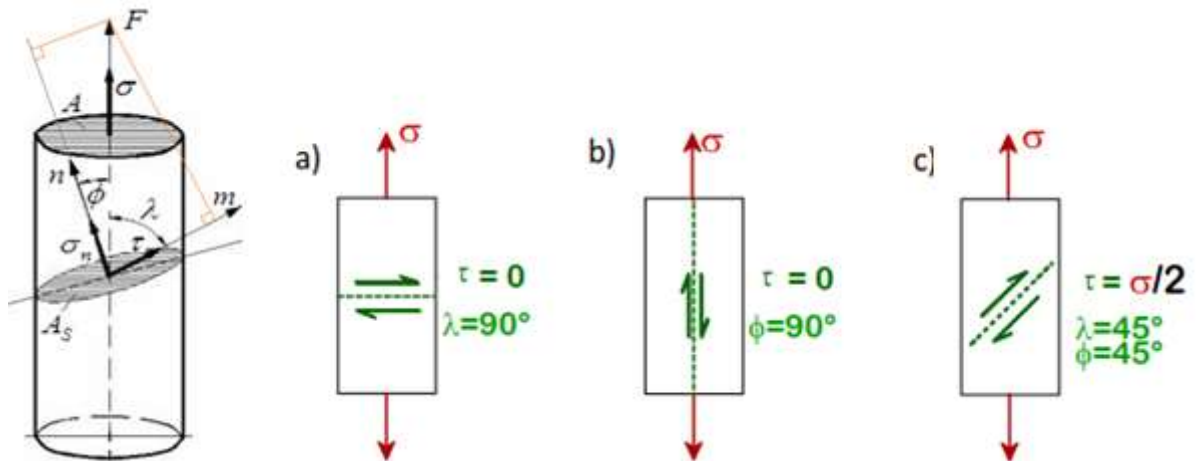


Рис.4.4. Залежність напруження зсуву τ від λ і ϕ

Наклеп (наклепування)

Після зняття навантаження, що перевищує границю текучості, у зразку залишиться залишкова деформація. При повторному навантаженні зразка зростає границя текучості металу і зменшується його здатність до пластичної деформації, тобто відбувається зміцнення металу. **Зміцнення металу під дією пластичної деформації називається наклепом.**

Зміцнення в наслідок наклепу пояснюється істотним підвищенням щільності дислокацій, характерним для процесу пластичної деформації. Одночасно в процесі пластичної деформації збільшується кількість точкових недосконалостей – вакансій і міжвузлових атомів. З ростом щільності дислокацій і недосконалостей кристалічної будови ускладнюється вільне переміщення дислокацій. Додаткові бар'єри для дислокацій створюються за рахунок деформації зерен і дроблення блоків. Всі ці фактори сприяють зміцненню металу при наклепі.

В результаті пластичної деформації істотно змінюються фізико-хімічні властивості металу. Із збільшенням ступеня деформації підвищується електроопір, знижується магнітна проникність, густина металу та опір корозії через посилення дифузійних процесів. Зниження густини зумовлено зниженням компактності просторової ґратки внаслідок виникнення в ній дефектів.

Під дією деформації, зерна змінюють свою форму і орієнтування, утворюючи волокнисту структуру з переважним орієнтуванням кристалів. Відбувається розворот безладно орієнтованих зерен осями з найбільшою міцністю вздовж напрямку деформації. Зерна деформуються і сплющуються, витягаючись у напрямку деформації.

Переважаюче кристалографічне орієнтування зерен уздовж напрямку деформації називається текстурою металу. Утворення текстури сприяє появі анізотропії властивостей.

Для деяких сплавів наклеп є єдиним методом підвищення механічних властивостей. Це сплави, що не зміцнюються термічною обробкою. До таких матеріалів відносяться, наприклад, корозійно-стійкі хромонікелеві сталі.

Відпал. Повернення і рекристалізація

Стан пластично деформованого металу термодинамічно нестійкий. Перехід у стабільніший стан відбувається при нагріванні. Термічна обробка, що включає нагрівання металу, витримку і наступне повільне охолодження (разом з піччю) називається відпалом (відпаленням).

Процеси, що протікають при нагріванні, підрозділяють на дві основні стадії: повернення і рекристалізація (рис. 4.5).

Під поверненням розуміють усі зміни кристалічної будови і пов'язаних з нею властивостей, а саме: зняття спотворень кристалічної ґратки, зменшення щільності дислокацій за рахунок їх анігіляції, зменшення кількості вакансій, зниження внутрішніх напружень. Однак, значних змін структури не відбувається і витягнута форма зерен зберігається. **При поверненні розрізняють стадії: відпочинок і полігонізація.**

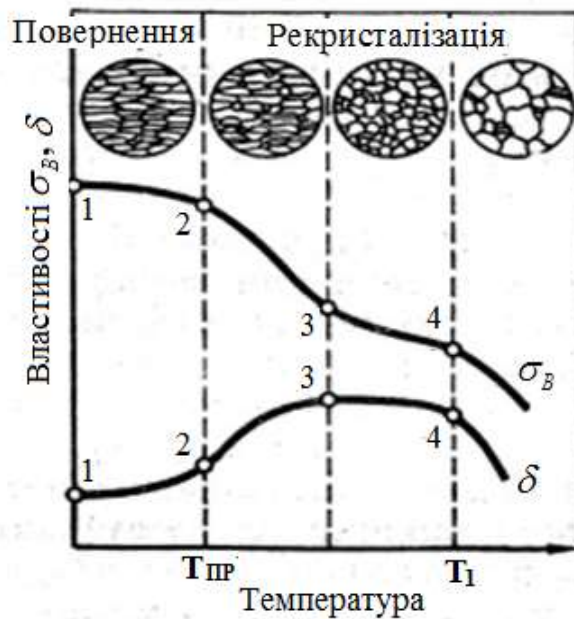
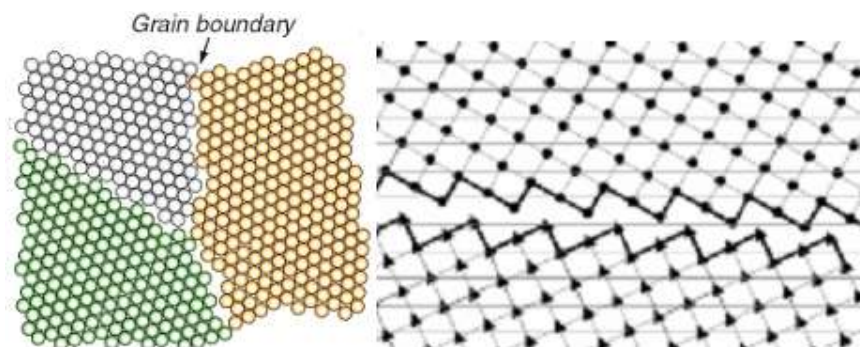


Рис. 4.5. Схема зміни структури і властивостей деформованого металу при нагріванні

Відпочинок охоплює зміни в тонкій структурі (в основному зменшення кількості точкових дефектів).

Полігонізація охоплює процеси утворення субзерен з малокутовими межами (полігональної структури, що складається з субзерен /полігонів у вигляді неправильних многогранників), що виникають при ковзанні і переповзанні дислокацій. Будова перехідного шару сприяє скупченню в ньому дислокацій. На межах зерен підвищена концентрація домішок, що знижує поверхневу енергію. Однак і всередині зерна ніколи не спостерігається ідеальної будови кристалічної решітки. Є ділянки, розорієнтовані одна відносно іншої на кілька градусів. Ці ділянки називаються фрагментами. **Процес розподілу зерен на фрагменти називається фрагментацією або полігонізацією.** В свою чергу, кожен фрагмент складається з блоків, розмірами < 10 мкм, розорієнтованих на кут менше одного градуса. Таку структуру називають блоковою або мозаїчною.



При подальшому нагріванні відбувається зміна мікроструктури наклепуваного металу. З підвищенням температури рухливість атомів зростає і утворюються нові зерна замість орієнтованої волокнистої структури, тобто відбувається *первинна рекристалізація*. Під рекристалізацією розуміють групу явищ, що охоплюють процеси зародження і росту нових зерен з меншою кількістю дефектів будови. По завершенні первинної рекристалізації відбувається зростання зерен, що утворились. Ця стадія рекристалізації називається *збиральною рекристалізацією*. Температуру початку рекристалізації називають температурним порогом рекристалізації ($T_{\text{ПР}}$).

Розмір рекристалізованих зерен залежить від величини перегрівання вище температурного порогу рекристалізації і від ступеня попередньої деформації.

Ступінь деформації (зазвичай 3...8 %), при якій нагрівання деформованого тіла призводить до гігантського росту рекристалізованих зерен, називається критичною.

Температура рекристалізації залежить від температури плавлення металу і визначається за формулою:

$$T_{РЕКР} = \alpha T_{ПЛ}, \quad (4.2)$$

де $T_{РЕКР}$ і $T_{ПЛ}$ - абсолютні температури рекристалізації і плавлення; α - коефіцієнт, що залежить від чистоти металу, чим чистіше метал, тим α менше.

В таблиці 4.1 наведено температури рекристалізації та плавлення деяких металів і сплавів.

Таблиця 4.1

Метал	Температура рекристалізації, °С	Температура плавлення, °С
Свинець	-4	327
Олово	-4	232
Цинк	10	420
Алюміній	80	660
Мідь	120	1085
Латунь	475	900
Нікель	370	1455
Залізо	450	1539
Вольфрам	1200	3410

Якщо деформацію металу ведуть при температурі, нижче за температуру рекристалізації, то таку обробку називають холодною. При холодній обробці метал деформаційно зміцнюється. При обробці, що ведеться вище за температури рекристалізації, зміцнення знімається рекристалізаційними процесами. Така обробка називається гарячою.

Розмір зерен, одержаних в результаті рекристалізації, має суттєвий вплив на властивості металу. Утворення великих зерен під час нагрівання знижує механічні властивості металу.

Пластичність, тобто здатність металів зазнавати значну пластичну деформацію, є одним з найважливіших властивостей металів. Завдяки пластичності здійснюється обробка металів тиском, а саме: вальцювання (заготовка обтискується обертовими валками прокатного стану); волочіння (протягування заготовок крізь отвір, що поступово звужується); пресування / екструзія (витискання металу із замкненого об'єму крізь калібрувальний отвір); кування (місцеве прикладення деформуючих ударних навантажень); штампування (отримання заготовок за допомогою штампів).

Пластичність дозволяє перерозподіляти локальні напруження рівномірно по всьому об'єму металу, що зменшує небезпеку руйнування.

Істинні напруження і деформації

Напруження поділяють на умовне та істинне. Умовним напруженням називають відношення величини навантаження до початкового перерізу зразка A_0 ; істинним - до перерізу A_i , який набуває зразок на момент досягнення даного навантаження.

Істинне напруження використовуються в тих випадках, коли в ході випробування зразків вдається безперервно вимірювати поточну площу поперечного перерізу зразка. Істинне напруження визначається з рівняння:

$$\sigma_{TR} = \frac{F}{A_i}.$$

В області пластичних деформацій виконується закон сталості об'єму зразка, тобто $V_i = V_0$, тому:

$$A_i l_i = A_0 l_0; \quad \frac{F}{A_i l_i} = \frac{F}{A_0 l_0}; \quad \frac{\sigma_{TR}}{l_i} = \frac{\sigma}{l_0}; \quad \sigma_{TR} = \sigma \frac{l_i}{l_0};$$

$$\sigma_{TR} = \sigma \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \sigma(1 + \varepsilon). \quad (4.3)$$

Деформацію також поділяють на умовну ε та істинну ε_{TR} . Умовною деформацією ε називають відношення величини абсолютної поздовжньої деформації Δl до початкової довжини l_0 робочої частини зразка:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l_0} = \frac{1}{l_0} \int_{l_0}^l dl = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Істинна пластична деформація ε_{TR} (істинне відносне видовження) дорівнює:

$$\varepsilon_{TR} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right).$$

В завершеній формі співвідношення між істинною і умовною деформаціями має вигляд:

$$\varepsilon_{TR} = \ln(1 + \varepsilon). \quad (4.4)$$

Для деяких металів і сплавів область істинної кривої напруження-деформації від початку пластичної деформації до того моменту, коли утворюється шийка, апроксимується залежністю:

$$\sigma_{TR} = K \varepsilon_{TR}^n. \quad (4.5)$$

У цьому виразі K і n є константами, значення яких залежать від сплаву, стану матеріалу, тобто, чи був він пластично деформований, термічно оброблений і т. п.. Показник ступеня n називають показником деформаційного зміцнення. Діаграми розтягу пластичних металів з умовними напруженнями відрізняються від діаграм з істинними напруженнями (рис. 4.6).

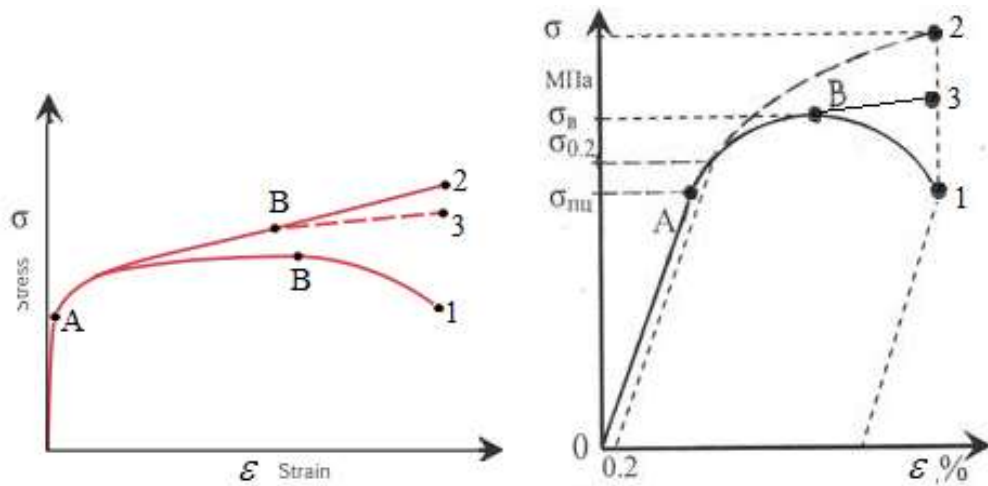


Рис. 4.6. Діаграми напруження-деформація: 1 – умовна діаграма; 2 – істинна діаграма; 3 – апроксимована діаграма

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Механізм пружної та пластичної деформації.
2. Назвіть системи ковзання для металів з ОЦК, ГЦК та ГЦП ґратками.
3. Назвіть типи дефектів кристалічної будови та їх вплив на властивості металів.
4. Поняття наклепу (наклепування). Роль дислокацій у цьому процесі.
5. Густина дислокацій до та після холодної пластичної деформації.
6. Теоретична та реальна міцність металів.
7. Вплив холодної пластичної деформації на структуру та властивості металів.
8. Які процеси відбуваються в холоднодеформованому металі при нагріванні? Їх рушійні сили.
9. Як змінюються показники міцності і пластичності наклепаного металу при нагріванні?
10. Який процес називають відпочинком?
11. У чому полягає різниця між процесами полігонізації та рекристалізації?
12. Поясніть суть процесу рекристалізації. Чим первинна рекристалізація відрізняється від збиральної рекристалізації.

13. Критичний ступінь деформації.
14. Температурний поріг рекристалізації та визначення температури рекристалізаційного відпалення.
15. Холодна та гаряча пластична деформація. Їх відмінні особливості.
16. Що таке полігонізація?
17. Як залежить температура рекристалізації від чистоти металу?
18. Що таке температурний поріг рекристалізації?
19. Яку обробку металу тиском називають гарячою, а яку холодною?
20. Як впливає ступінь деформації на температуру рекристалізації?
21. Який зв'язок між температурою початку рекристалізації і температурою плавлення?

ЛЕКЦІЯ 5

ОСНОВИ ТЕОРІЇ СПЛАВІВ

Основні поняття: сплав, система, компонент, фаза

Сплав - це речовина, яку одержують поєднанням (сплавленням, спіканням, електролізом) двох або більше елементів. Найчастіше сплави одержують шляхом розплавлення двох або більше елементів (металів або неметалів) з наступною їхньою кристалізацією.

Система - це сукупність металів або металевих сплавів, обраних для спостереження впливу на них певних факторів (температури, тиску, концентрації). Систему називають рівноважною, якщо перетворення в ній при нагріванні та охолодженні відбуваються зворотно, а рівноважні умови досягаються при незначному перегріванні чи переохолодженні.

Компонент - незалежна складова частина системи (сплаву). Компонентами можуть бути чисті метали (елементи) або стійкі хімічні сполуки. В металознавстві під компонентами розуміють елементи (метали і неметали), що утворюють сплав. Отже, чисті метали - це однокомпонентні системи, сплави з двох елементів - двокомпонентні системи і т. д. Кількість компонентів позначають літерою К.

Фаза – це однорідна частина системи, відокремлена від інших частин системи поверхнею розділу, при переході через яку структура і властивості різко змінюються. У сплавах фазами можуть бути чисті метали, рідкі або тверді розчини, хімічні сполуки. Фази відрізняються одна від одної за агрегатним станом, хімічним складом, типом кристалічної решітки. Кількість співіснуючих у сплаві фаз позначають літерою Ф.

Структура і властивості сплавів відрізняються від структури і властивостей елементів, що їх утворюють. Сплав, отриманий переважно з металів, який має металеві властивості, називають металевим сплавом. Порівняно з чистими металами сплави мають більш цінний комплекс

механічних, фізичних і технологічних властивостей. Залежно від кількості елементів (компонентів), що входять до складу сплаву, розрізняють дво-, три- або багатоконпонентні сплави (системи).

В розплаві всі компоненти сплаву знаходяться в атомарному стані, утворюючи рідкий однорідний розчин із статистично однаковим хімічним складом.

Правило фаз. Закон Гіббса

Кількість незалежних змінних (температура, концентрація, тиск), які, не порушуючи рівноваги системи, можна змінювати у певних межах, визначає кількість ступенів свободи системи.

Рівноважним називають такий стан сплаву, що не змінюється в часі. При рівновазі зберігається й кількість співіснуючих фаз. Якщо, за таких умов, можна змінювати, наприклад, лише температуру (одна змінна), то кількість ступенів свободи дорівнює 1.

Закономірності всіх змін системи, залежно від внутрішніх і зовнішніх умов, підпорядковані правилу фаз Гіббса. Цей математичний вираз умов рівноваги системи визначає залежність між кількістю фаз, компонентів і ступенів свободи системи:

$$C = K + V - \Phi, \quad (5.1)$$

де C - кількість ступенів свободи;

K - кількість компонентів;

V - зовнішні змінні фактори: температура, тиск;

Φ - кількість фаз, що знаходяться в рівновазі.

Якщо прийняти тиск постійним, то для металевих систем $V = 1$, тобто із зовнішніх змінних факторів слід враховувати лише температуру. В цьому випадку правило фаз Гіббса набуває вигляду:

$$C = K + 1 - \Phi. \quad (5.2)$$

Розглянемо можливі умови рівноваги для *однокомпонентних систем*. В такій системі, наприклад у чистому металі, коли є лише одна фаза (розплав

або твердий метал): $K = 1$, $\Phi = 1$. В цьому випадку, ступінь свободи системи дорівнює:

$$C = K + 1 - \Phi = 1 + 1 - 1 = 1. \quad (5.3)$$

Це означає, що метал можна охолоджувати або нагрівати, зберігаючи його однофазним (рідким або твердим) лише за певного інтервалу температур.

При плавленні або кристалізації в однокомпонентній системі існують вже дві фази - рідкий і твердий метал: $K = 1$, $\Phi = 2$. В цьому випадку, ступінь свободи системи дорівнює:

$$C = K + 1 - \Phi = 1 + 1 - 2 = 0. \quad (5.4)$$

Тобто, система не має жодного ступеня свободи, і рівновага можлива тільки при постійній температурі. Дійсно, тверднення чистих металів відбувається за постійної температури і на кривій охолодження (нагрівання) їй відповідає горизонтальна ділянка.

У двокомпонентних системах сплав кристалізується за інших умов, оскільки $K = 2$, $\Phi = 2$ і ступінь свободи системи дорівнює:

$$C = K + 1 - \Phi = 2 + 1 - 2 = 1. \quad (5.5)$$

Система має одну змінну - один ступінь свободи, тобто рівновага між рідкою та твердою фазами при кристалізації зберігається в інтервалі температур. Для цього на кривій охолодження з'являються точки (температури) початку та кінця кристалізації сплаву. *Наявність інтервалу кристалізації є важливою особливістю, що характерна для кристалізації сплавів.*

Сплави

За характером взаємодії компонентів у сплаві розрізняють: механічні суміші, хімічні сполуки, тверді розчини, проміжні фази.

Механічні суміші

При формуванні механічної суміші, атоми кожного з компонентів сплаву утворюють власні кристалічні ґратки, тобто кожний елемент

кристалізується самостійно. **Механічну суміш, яку утворюють два компоненти, що нездатні взаємо розчинюватись або утворювати хімічну сполуку при кристалізації з рідкого стану, називають евтектикою.** Структура сплавів такого типу (олово-цинк Sn - Zn, стибій -плюмбум Sb - Pb) неоднорідна (гетерогенна). Властивості таких сплавів будуть усередненими, виходячи з рівня властивостей компонентів та їхнього кількісного вмісту у сплаві.

Хімічні сполуки

Утворення хімічної сполуки при кристалізації зумовлено здатністю різнорідних атомів, які відрізняються за будовою і властивостями, об'єднуватись у певній пропорції, утворюючи новий тип кристалічної ґратки, що відрізняється від ґраток компонентів сплаву. При цьому утворюється речовина з новими властивостями, для якої характерно:

- чітке співвідношення кількості атомів елементів, що її утворюють, наприклад, Fe_3C , Fe_2O_3 ;
- наявність власного типу кристалічної ґратки;
- певна (постійна) температура плавлення;
- суттєва відмінність у властивостях порівняно з вихідними елементами;
- стрибкоподібна зміна властивостей при зміні хімічного складу.

Тверді розчини

В розплаві всі компоненти сплаву знаходяться в атомарному стані, утворюючи рідкий однорідний розчин із статистично однаковим хімічним складом. Якщо при переході сплаву з рідкого стану у твердий зберігається однорідність і розчинність елементів, що його утворюють, то такий сплав називають твердим розчином. При утворенні твердого розчину один з елементів зберігає власну кристалічну ґратку (розчинник), а інший у вигляді окремих атомів розподіляються у його кристалічній ґратці. Залежно від характеру їх розміщення в ґратці розчинника, розрізняють тверді розчини заміщення і тверді розчини проникнення (впровадження, втілення, вкорінення) (рис. 5.1). Утворення відповідного виду твердого розчину

пов'язане з типом кристалічної ґратки та співвідношенням атомних радіусів компонентів.



Рис. 5.1. Схема розташування атомів у твердих розчинах заміщення (а) та проникнення (б)

При утворенні твердих розчинів заміщення атоми компонента, що розчиняється, заміщують частину атомів розчинника у вузлах його кристалічної ґратки. Коли компоненти заміщують один одного у кристалічних ґратках у будь-яких кількісних співвідношеннях, то утворюється безперервна низка твердих розчинів. Таку необмежену розчинність (здатність утворювати тверді розчини при будь-яких пропорціях компонентів) мають лише метали з кристалічною ґраткою одного типу за умови, що параметри їхніх ґраток відрізняються не більше ніж на 8-13 %. Проте, допустима різниця в параметрах для різних пар металів різна. У сплавах на основі заліза необмежені тверді розчини можуть утворюватись за умови, що атомні діаметри елементів, які розчинюються, відрізняються від заліза не більше ніж на 8 %. Якщо різниця атомних діаметрів більше ніж 8 %, утворюються лише обмежені тверді розчини.

Взаємодію елементів у сплавах і характер структури зумовлює фізична природа елементів, тобто тип кристалічної ґратки, розташування елементів у періодичній системі Менделєєва тощо. Метали, що розташовані поблизу один від одного у таблиці Менделєєва, мають необмежену розчинність: Cu і Ni; Fe і Ni; Fe і Cr; Fe і Co; Co і Ni, або розташовані в одній групі: Bi і Sb, As і Sb, Au і Ag, Au і Cu.

Елементи з кристалічними ґратками різного типу, якщо їх атоми близькі за розмірами, можуть розчинюватись один в одному обмежено. Чим більша

різниця в розмірах атомів компонентів, тим менше вони розчинюються у твердому стані.

Обмежена розчинність компонентів характерна також при утворенні ними твердих розчинів проникнення, тобто таких, коли атоми розчинених компонентів розташовуються (втілюються) у міжвузлових об'ємах метала-розчинника. При цьому, атоми розміщуються там, де для них достатньо вільного об'єму. Ці порожнини малі за розміром, у них можуть розміститись елементи, атоми яких мають відповідні невеликі розміри (водень, азот, вуглець, бор). Вміст їх у твердому розчині проникнення не перевищує 1-2 %. Тобто такі сплави є твердими розчинами з обмеженою розчинністю компонентів.

Утворення твердих розчинів, як заміщення, так і проникнення, супроводжується зміною параметрів кристалічної ґратки метала-розчинника залежно від співвідношення розмірів атомів компонентів і відповідним зміцненням сплаву. Зміцнення пропорційне відносній зміні параметра ґратки, причому зменшення параметра призводить до більш суттєвого зміцнення, ніж його збільшення.

Властивості сплавів, що утворюють тверді розчини, відрізняються від властивостей елементів-компонентів. Проте сплави зберігають основні властивості металів, а саме: здатність до пластичної деформації, електропровідність тощо.

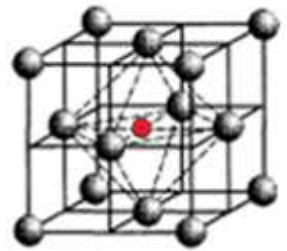
На відміну від механічної суміші твердий розчин є однорідним (однофазним), складається з одного виду кристалів, має одну (певну) кристалічну ґратку.

На відміну від хімічної сполуки твердий розчин існує не за строго визначеного співвідношення компонентів, а в інтервалі концентрацій.

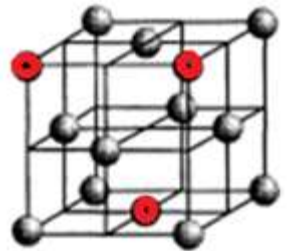
У металознавстві чисті компоненти позначають латинськими літерами А, В, С, а тверді розчини - грецькими літерами α , β , γ тощо.

Підсумуємо інформацію стосовно твердих розчинів. Твердими розчинами називають фази, в яких один із компонентів сплаву зберігає свою кристалічну ґратку, а атоми інших компонентів розміщуються у ґратці першого компонента (розчинника), змінюючи її параметри. В залежності від характеру розміщення атомів компонента, що розчиняється, у ґратці розчинника розрізняють тверді розчини заміщення і проникнення.

Тверді розчини проникнення утворюються шляхом розміщення атомів розчинного компонента в порах кристалічної ґратки розчинника. Це можливо тільки в тому випадку, коли атоми елемента, що розчиняється, мають невеликий розмір. До таких речовин належать елементи, які розташовані на початку періодичної системи Менделєєва, а саме: водень, вуглець, азот тощо ($R_H=0,046$ нм; $R_C=0,077$ нм; $R_N=0,071$ нм).



При утворенні твердого розчину заміщення атоми компонента, що розчиняється, заміщують частину атомів розчинника в його кристалічній ґратці. Тверді розчини заміщення можуть бути як з обмеженою, так і з необмеженою розчинністю. У твердих розчинах з необмеженою розчинністю можлива будь-яка концентрація розчинної речовини і розчинника. Для цього, згідно дослідженням Юм-Розері, необхідне виконання таких умов:



- ізоморфність кристалічних ґраток компонентів, що сплаваються;
- незначна різниця атомних радіусів компонентів – не більше 8...13%;
- близькість електрохімічних властивостей компонентів, тобто приналежність їх до однієї й тієї ж групи періодичної системи елементів або до суміжних груп.

Необмежено розчинюються, наприклад, Ag і Au (ГЦК, $\Delta R=0,2\%$), Ni і Cu (ГЦК, $\Delta R=2,7\%$).

Особливості кристалізації сплавів

Кристалізація - це перехід рідини у твердий (кристалічний) стан. Як всякий спонтанний процес, кристалізація протікає за термодинамічних умов, що забезпечують зниження енергії Гіббса системи.

Кристалізація складається з двох елементарних процесів - зародження центрів кристалізації і росту кристалів з цих центрів.

Швидкість кожного з процесів залежить від *ступеня переохолодження* n рідини відносно рівноважної температури, тобто температури, при якій енергії Гіббса рідкого і кристалічного станів рівні.

При ступені переохолодження $n=0$ утворення зародків кристалів (центрів кристалізації) неможливе, оскільки дорівнює нулю рушійний чинник процесу (різниця енергій Гіббса рідкого і твердого станів).

Зі збільшенням переохолодження ця різниця росте, викликаючи збільшення швидкості виникнення центрів кристалізації та швидкості зростання кристалів. Проте, зі збільшенням ступеня переохолодження n знижується дифузійна рухливість атомів, що викликає гальмування обох елементарних процесів. При значному переохолодженні атоми стають такими малорухомими, що кристалізація повністю пригнічується.

При невеликих значеннях ступеня переохолодження n , тобто при невеликій кількості центрів кристалізації і значній швидкості росту кристалів, утворюються крупнозернисті структури. Зі збільшенням переохолодження структури подрібнюються – число центрів кристалізації зростає швидше, ніж швидкість кристалізації.

Від ступеня переохолодження залежить критичний розмір зародка, тобто такий мінімальний розмір, при якому ріст зародка супроводжується зниженням енергії Гіббса системи. Зародки, що дрібніше за критичний розмір, до росту не здатні і розчиняються в рідині. Чим більше ступінь переохолодження рідини, тим менше критична величина зародка.

При кристалізації кристали, що оточені з усіх боків рідиною, мають більш менш правильну геометричну форму. При зіткненні зростаючих кристалів форма порушується, стає неправильною, оскільки ріст граней на ділянках зіткнення припиняється. Такі спотворені кристали називають *кристалітами* або *зернами*. Таким чином, форма і розмір зерен, що утворилися в результаті кристалізації, визначаються умовами зіткнення зростаючих кристалів.

В реальних умовах форма і розмір кристалів, що утворюються, окрім умов зіткнення, залежать від напрямку і швидкості відведення теплоти, температури рідкого металу, виду і кількості домішок (при рості кристалів на частках домішок, що грають роль готових центрів, утворення зародків називають *гетерогенним* на відміну від *гомогенного* - мимовільного утворення). Нерідко при кристалізації виникають розгалужені деревовидні кристали, звані *дендритами*

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення наступним поняттям: сплав, система, компонент, фаза.
2. Сформулюйте правило фаз Гіббса. Наведіть приклади визначення кількості ступенів свободи системи.
3. Дайте характеристику механічним сумішам, хімічним сполукам, твердим розчинам, проміжним фазам.
4. Чим відрізняються між собою тверді розчини заміщення і проникнення?
5. Які термодинамічні умови фазових перетворень?
6. Назвіть основні параметри процесу кристалізації.
7. Що таке переохолодження?
8. Який зв'язок між розміром зерна і швидкістю зародження та росту кристалів, а також ступенем переохолодження?

ЛЕКЦІЯ 6

ДІАГРАМИ СТАНУ СПЛАВІВ

Загальні відомості

Діаграми стану у графічній формі показують рівноважний фазовий склад сплавів в залежності від температури та співвідношення компонентів. Вони дозволяють вивчати послідовність і особливості фазових перетворень, що відбуваються у сплавах при повільному нагрівання та охолодженні, та оцінювати їх механічні, технологічні та фізико-хімічні властивості.

Діаграми стану сплавів будують на основі результатів експериментів з використанням методів термічного, магнітного, металографічного та інших аналізів. Найчастіше для цього використовують метод термічного аналізу, який базується на тому, що будь-які зміни у стані металу або сплаву (фазові та структурні перетворення) супроводжуються певними тепловими ефектами. Так, під час плавлення твердих кристалічних тіл тепло поглинається, а при кристалізації - виділяється.

Температури, при яких відбуваються зміни стану сплаву, називають критичними: $T_{пл}$ - температура плавлення; $T_{кр}$ - температура кристалізації.

Для побудови діаграм стану необхідно знати критичні температури сплаву. Визначають їх на основі аналізу швидкостей охолодження (нагрівання), графічно зображених у координатах температура - час (рис.6.1).

При охолодженні аморфного тіла його температура буде поступово і безперервно знижуватись. Це означає, що перехід з рідкого стану у твердий для аморфного тіла є поступовим, і температура плавлення не фіксується (рис.6.1, а).

Кристалізація чистих металів відбувається за постійної температури (рис. 6.1, б), а сплавів (рис.6.1, в, г) - в інтервалі температур від T_1 до T_2 . Початок і кінець цього інтервалу температур визначають точки перегину на графіку охолодження, які характеризують зміну швидкості охолодження

розплаву (початок і кінець перетворення) і відповідають критичним температурам (точкам) металу або сплаву. Виділення внутрішньої теплоти кристалізації призводить до зменшення швидкості охолодження сплаву (утворення твердого розчину) або тимчасової зупинки спаду температури (утворення механічної суміші, хімічної сполуки).

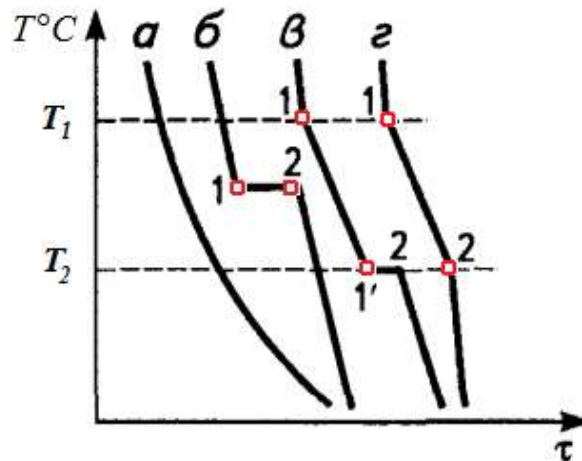


Рис. 6.1. Графіки охолодження: а - охолодження аморфного тіла; б - охолодження чистого металу; в - охолодження сплаву з евтектикою; г - охолодження сплаву з утворенням твердого розчину. T_1 і T_2 - температури початку і кінця кристалізації сплавів

Методи побудови діаграм стану сплавів

Побудова діаграм стану сплавів базується на експериментальному одержанні серії кривих (графіків) охолодження розплавів з різним (заданим) співвідношенням компонентів системи та визначенні критичних температур фазових перетворень. Обладнання для термічного аналізу складається з нагрівальної та контролюючої температури апаратури.

Температуру початку кристалізації сплаву називають точками ліквідус, а закінчення кристалізації - солідус. Для побудови діаграми стану на осі абсцис відкладають концентрацію (масову частку, вміст,) компонентів досліджуваних сплавів (рис. 6.2).

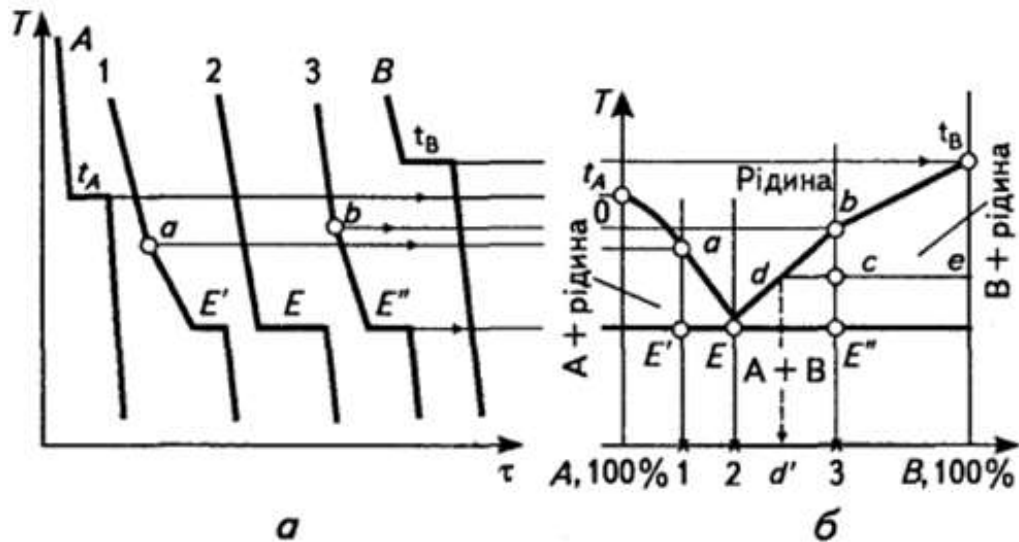


Рис. 6.2. Схема побудови діаграми стану двокомпонентної системи (А - В) з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані і нерозчинних у твердому: а - криві охолодження; б - діаграма фазової рівноваги компонентів А і В

Крайня точка ліворуч по осі концентрації відповідає 100 % компонента А і 0 % В (початок осі абсцис), а крайня точка праворуч відповідає 100 % компонента В і 0% компонента А. Значення температури відкладають по осі ординат. У цих координатах будують графіки охолодження чистих компонентів та сплавів на їх основі. З'єднуючи всі точки початку кристалізації на кривих охолодження в одну лінію, а всі точки кінця кристалізації в іншу, одержують основні лінії (відповідно ліквідус і солідус) діаграми стану сплавів системи А - В. Вище лінії ліквідус сплави перебувають у рідкому стані, нижче лінії солідус - у твердому, а у межах між ними водночас існують рідка і тверда фази.

Сплави з різним вмістом компонентів А і В мають різний фазовий склад, структуру, а отже, і властивості. Діаграми стану дають уявлення про формування структури і фазового складу будь-якого сплаву даної системи залежно від: співвідношення (концентрації) компонентів, температури, заданої швидкості охолодження; дозволяють простежити зміни (за визначених умов) певних фізичних і механічних властивостей.

Основні типи діаграм стану сплавів

Діаграми стану сплавів графічно показують залежність стану сплавів даної системи від концентрації та температури. Вони дозволяють визначити не лише температури кристалізації та плавлення, а й які саме перетворення можуть відбуватись у сплавах за різних температур, тобто характеризують стан сплаву.

Однокомпонентна діаграма є температурною шкалою з нанесеними на неї точками фазових перетворень.

Трикомпонентні діаграми мають вигляд тригранної рівносторонньої призми, в основі якої лежить концентраційний трикутник (рис. 6.3), а ребра є температурними осями. Вершини концентраційного трикутника відповідають 100 % кожного з компонентів А, В, С. Кожна точка на сторонах трикутника відповідає подвійному сплаву. Кожна точки усередині трикутника відповідає потрійному сплаву.

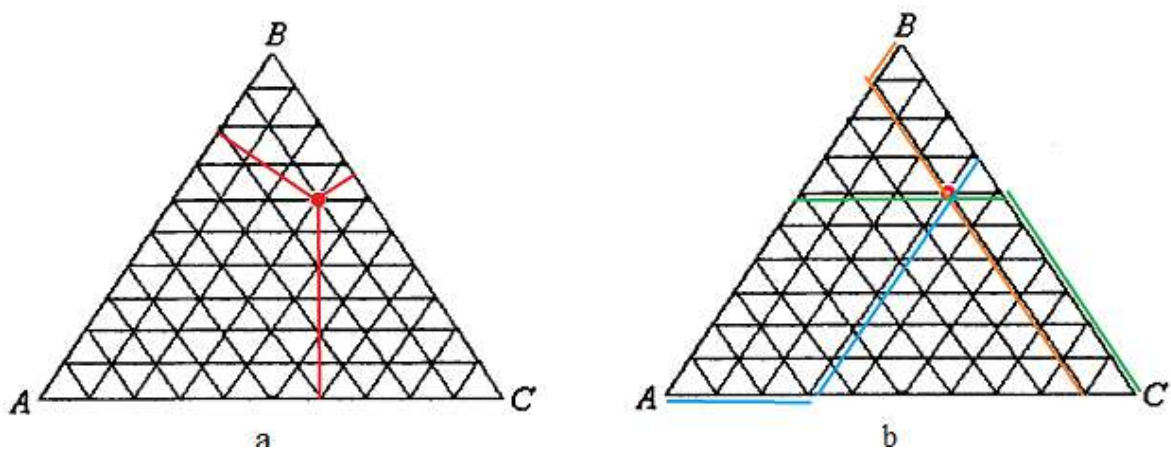


Рис. 6.3. Методи визначення складу сплаву потрійних систем за перпендикулярами (а) та відрізками на сторонах концентраційного трикутника (б)

Двокомпонентна діаграма, окрім температурної осі (осі ординат), має вісь концентрацій (вісь абсцис). Один кінець осі абсцис відповідає чистому компоненту, наприклад А, інший - В. Усі проміжні точки осі відповідають сплавам з різним співвідношенням компонентів. Розглянемо основні типи двокомпонентних діаграми в залежності від взаємодії між компонентами А і В у твердому стані.

Діаграми стану системи, компоненти яких утворюють неперервний ряд рідких і твердих розчинів (II тип)

Діаграми стану цього типу утворюють у твердому стані кристалічні тверді розчини з необмеженою взаємною розчинністю компонентів. При охолодженні таких сплавів з розплаву випадають кристали твердого розчину з різним співвідношенням компонентів. Криві охолодження сплавів різного складу та структури в залежності від стану сплавів показані на рис. 6.4. Прикладом таких сплавів може слугувати система сплавів Cu - Ni.

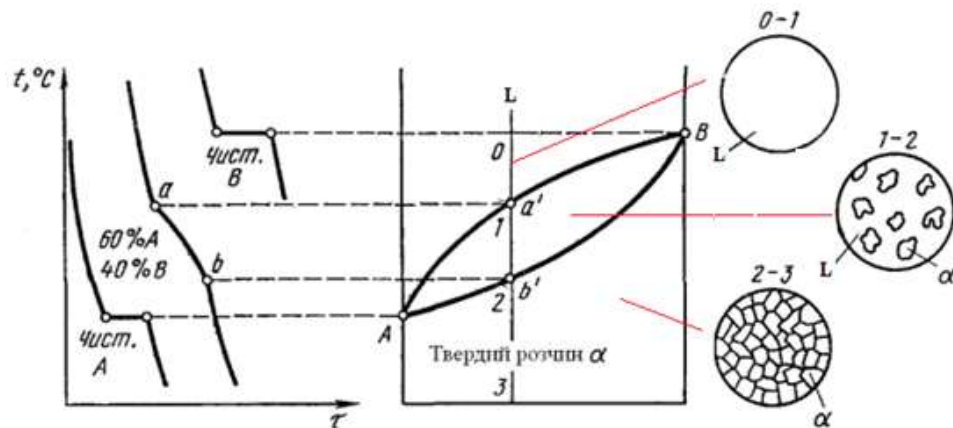


Рис. 6.4. Криві охолодження сплавів різного складу та структури залежно від стану сплавів

За діаграмою стану можна прослідкувати за фазовими перетвореннями будь-якого сплаву та визначити склад і кількісне співвідношення фаз у будь-якій точці двофазної області. Простежимо за процесом кристалізації сплаву концентрації K (рис. 6.5).

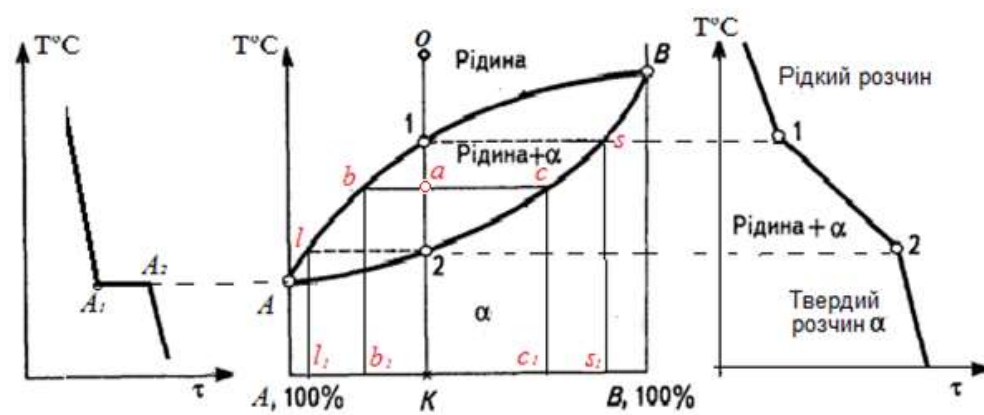


Рис. 6.5. Діаграми стану сплавів системи А – В

При температурі точки O сплав знаходиться в однофазовій області рідкого розчину. В точці 1 починається кристалізація сплаву і в точці 2 вона закінчується. Нижче від точки 2 жодних структурних перетворень у сплаві не відбувається. Виберемо на лінії концентрації K точку a . В цій точці в рівновазі перебувають дві фази - рідкий розчин і твердий розчин α .

Щоб визначити хімічний склад фаз при температурі точки a , скористаємось першим положенням правила відрізків (правило концентрацій): проведемо через цю точку горизонтальну лінію - коноду до перетину з лініями ліквідус в точці b і солідус в точці c . Спроекувавши на вісь концентрацій ці точки, отримаємо точки b_1 і c_1 , які показують хімічний склад рідкого й твердого розчинів.

Склад рідкого розчину при температурі початку кристалізації (т.1) визначається точкою K , а при температурі кінця кристалізації (т.2) - точкою l_1 .

Склад твердого розчину при температурі початку кристалізації (т.1) визначається точкою s_1 , а при температурі кінця кристалізації (т.2) - точкою K .

Таким чином, склад рідкого розчину в процесі кристалізації змінюється по лінії ліквідус на відріжку $1bl$, а склад твердого розчину - по лінії солідус на відріжку sc_2 . Якщо кристалізація відбувається в рівноважних умовах, хімічний склад твердого розчину вирівнюється завдяки дифузії, в результаті чого при температурі точки 2 весь твердий розчин матиме склад цієї точки.

Для визначення масової частки кожної фази застосовують друге положення правила відрізків, а саме: через фігуративну точку a проводять коноду - її відрізки обернено пропорційні кількості кожної з фаз.

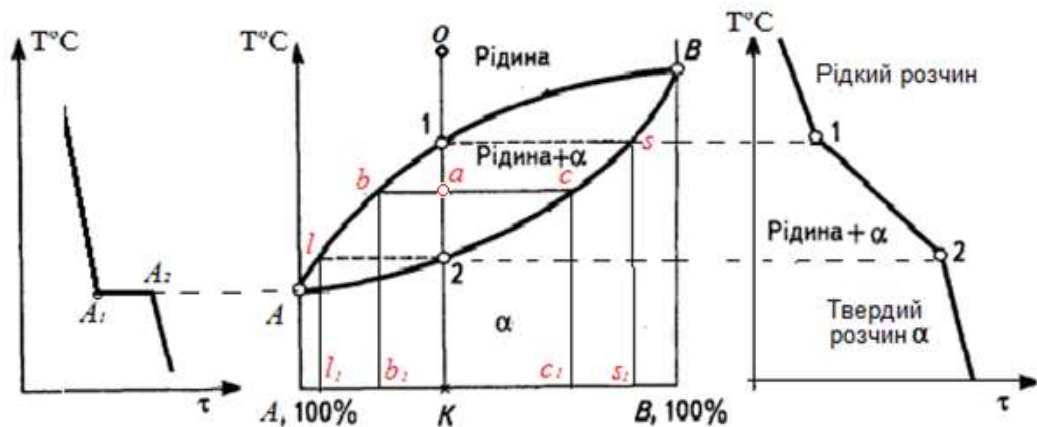
$$\text{Масова частка рідкого розчину } W_L \text{ дорівнює: } W_L = \frac{ca}{cb} 100\% .$$

$$\text{Масова частка твердого розчину } W_\alpha \text{ дорівнює: } W_\alpha = \frac{ab}{cb} 100\% .$$

Аналіз кривих охолодження

Крива охолодження сплаву концентрації K складається з трьох ділянок: верхньої, що лежить над точкою 1; середньої - між точками 1 і 2; нижньої - під точкою 2. В межах верхньої та нижньої ділянок маємо одну фазу - рідкий розчин та твердий розчин α , відповідно. В межах середньої ділянки - одночасно обидві названі фази ($\Phi=2$). Кількість ступенів свободи дорівнює

$$C = K + 1 - \Phi = 2 + 1 - 2 = 1.$$



Кут нахилу середньої ділянки до осі абсцис менший, ніж відповідні кути нахилу верхньої та нижньої ділянок, що пов'язано з ефектом виділення прихованого тепла кристалізації. Середня ділянка починається в точці 1 закінчується у точці 2.

Крива охолодження чистого компоненту A складається також із трьох ділянок: верхньої, середньої та нижньої. В межах середньої ділянки між точками A_1 і A_2 маємо одночасно дві фази – кристали A й рідину. Таке співіснування двох фаз ($\Phi=2$) в однокомпонентній ($K=1$) речовині можливе тільки при сталій температурі, коли кількість ступенів свободи дорівнює нулю, що підтверджується правилом фаз:

$$C = K + 1 - \Phi = 1 + 1 - 2 = 0.$$

Діаграми стану системи з відсутністю взаємної розчинності компонентів у твердому стані (I тип)

До цього типу відносяться діаграми, компоненти яких необмежено розчинні в рідкому стані та практично нерозчинні у твердому. На цій діаграмі (рис. 6.6) лінії мають такі назви та фізичний зміст.

Лінія A_1CB_1 – лінія ліквідус – геометричне місце точок (температур) початку кристалізації сплавів даної системи. При цьому, по лінії A_1C починається кристалізація чистого компонента А, а по лінії CB_1 – компонента В.

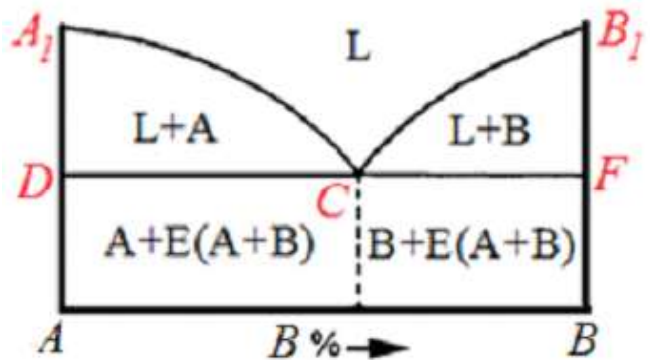


Рис.6.6

Лінія DCF – лінія солідус – геометричне місце точок кінця кристалізації. Крім того, лінія DCF має назву лінії евтектичного перетворення, суть якого полягає в тому, що рідка фаза, склад якої відповідає точці С діаграми, кристалізується з утворенням одночасно кристалів А і В.

Механічна суміш двох видів кристалів, які одночасно кристалізуються із рідкої фази, називається *евтектикою*. Евтектичний сплав має найнижчу температуру кристалізації серед сплавів даної системи.

Сплави, які розміщені лівіше точки С, називаються доевтектичними. Їх структура складається із окремих кристалів компонента А та евтектики.

Сплав, який за хімічним складом відповідає точці С діаграми, називається евтектичним і його структура повністю складається з евтектики.

Сплави, які розміщені правіше точки С діаграми, називаються заевтектичними. Їх структура складається із надлишкових окремих кристалів компонента В і евтектики. До таких сплавів належать, наприклад, сплави систем Pb–Sb, Sn–Zn.

Сплав, що представлений на рисунку 6.7, з концентрацією $Sb=13\%$, $Pb=87\%$ (т. Е), називається евтектичним. Для евтектичних сплавів характерно:

- найменша температура плавлення серед сплавів даної системи, тобто температура кристалізації нижче за температуру плавлення чистих компонентів сплаву;
- початок і кінець кристалізації відбувається при одній і тій же температурі;
- структура таких сплавів є механічною сумішшю компонентів.

Склад і кількість кожної фази у будь-якій двофазовій області діаграми стану дозволяють визначити правило концентрацій і правило відрізків.

Для визначення вмісту компонентів у фазах сплаву, на діаграмі стану проводять горизонтальну лінію (коноду) до перетину з лініями, що обмежують цю область. Проекції точок перетину коноди з лініями діаграми на вісь концентрації показують склад фаз.

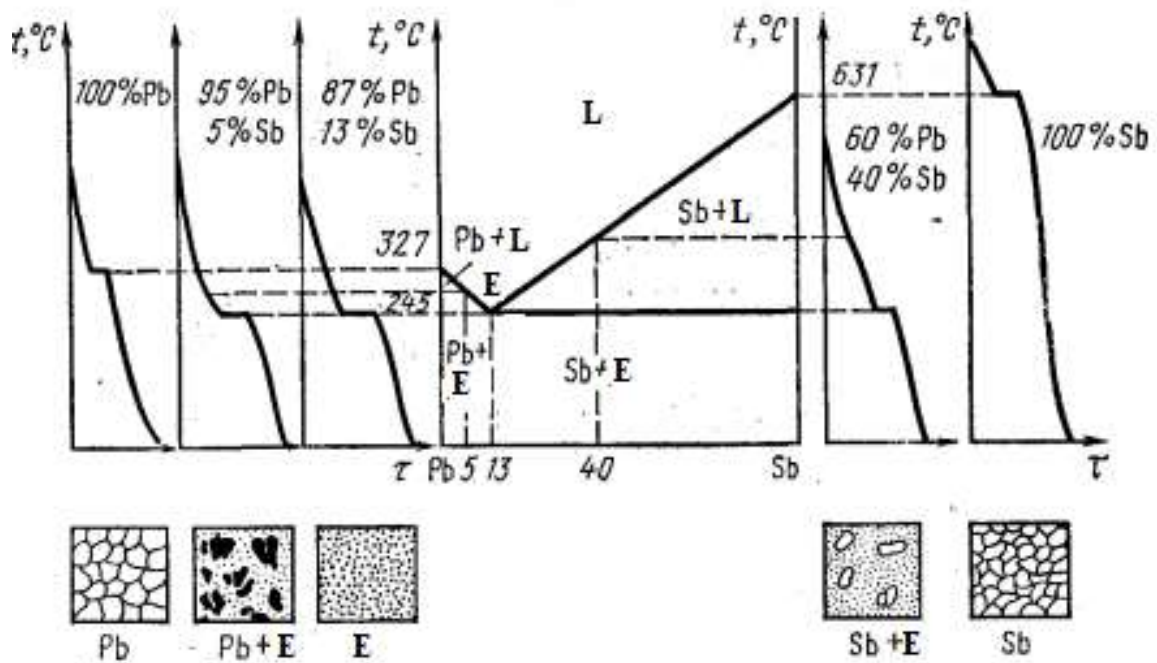


Рис.6.7. Діаграма стану сплавів Pb–Sb

Для визначення кількісного співвідношення фаз (масових часток) визначають довжину відрізків коноди від заданої точки діаграми до точок, що

відповідають складу фаз. Довжини цих відрізків обернено пропорційні масовим часткам фаз.

Діаграми стану системи з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (III тип)

В даній системі (рис. 6.8) кристали чистих компонентів А і В при кристалізації не утворюються, а утворюються кристали обмежених твердих розчинів α і β . α - твердий розчин компонента В в А; β - твердий розчин компонента А в В.

Утворення α -твердого розчину починається по лінії A_1E , а утворення β -твердого розчину - по лінії B_1E , тобто лінія A_1EB_1 – це лінія ліквідусу.

По лінії A_1C закінчується процес кристалізації α -твердого розчину, а по лінії B_1D - β -твердого розчину.

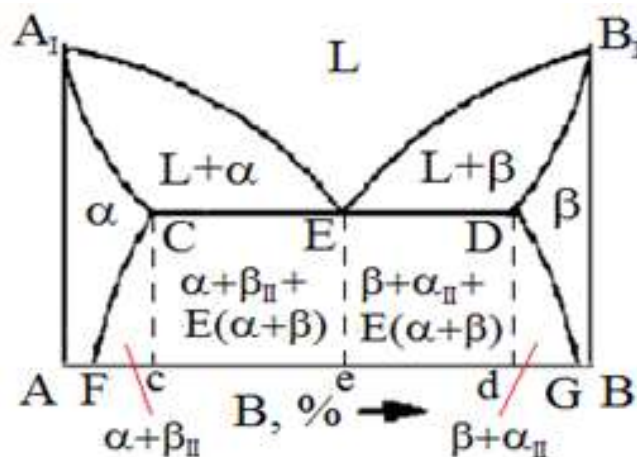


Рис. 6.8

Лінія A_1CEDB_1 – лінія солідусу. Лінія CED – це лінія евтектичного перетворення, суть якого полягає в утворенні із рідкого сплаву евтектичного складу одночасно суміші кристалів твердих розчинів α і β . Реакція утворення евтектики має вигляд: $L_E = \text{евтектика } (\alpha + \beta)$.

Лінії CF і DG називаються сольвусом – це лінії граничної концентрації, відповідно, компонента В в α -твердому розчині та А в β -твердому розчині.

По лінії CF при зниженні температури із α -твердого розчину починається виділення надлишкового компонента В у вигляді β -фази (вторинні кристали), а по лінії DG – надлишкового компонента А у вигляді α -фази (вторинні кристали) із β -твердого розчину.

Сплави даної системи поділяються на доевтектичні, евтектичні та заевтектичні (аналогічно сплавам діаграми стану I типу) - це діаграма сплавів, компоненти яких утворюють тверді розчини з евтектикою твердих розчинів. Така діаграма характерна, наприклад, для системи сплавів Cu-Ag.

Діаграма сплавів, компоненти яких утворюють стійку хімічну сполуку (IV тип)

Діаграму стану такого типу наведено на рис. 6.9. Хімічну сполуку A_mB_n , яку утворюють компоненти А і В, можна розглядати як новий, третій компонент, що поділяє діаграму стану А-В на дві діаграми першого типу: А- A_mB_n і A_mB_n -В.

Для діаграми А- A_mB_n : A_1CD – лінія ліквідус, ECF – лінія солідус.

Для діаграми A_mB_n -В: DSB_1 – лінія ліквідус, MSN – лінія солідус.

По лінії A_1C починається кристалізація компонента А, по лінії B_1S – компонента В, а по лініях CD і DS – хімічної сполуки A_mB_n . По лініях ECF і MSN відбуваються евтектичні перетворення

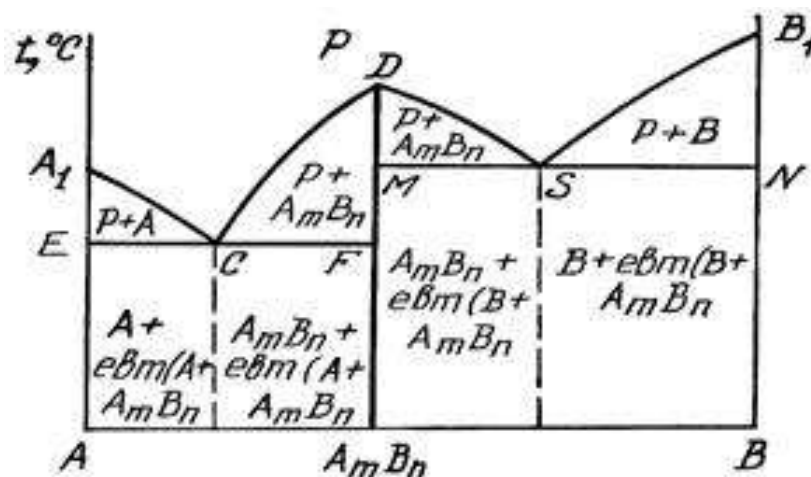


Рис. 6.9

Такий тип діаграми (рис. 6.9) характерний, наприклад, для сплавів системи Mg-Ca. Хімічну сполуку AnB_m (Mg_4Ca_3) можна розглядати як третій компонент, що поділяє діаграму стану системи A - B (Mg-Ca) на дві діаграми I типу: системи A - AnB_m (Mg - Mg_4Ca_3) та AnB_m - B (Mg_4Ca_3 - Ca).

Зв'язок між типом діаграми стану сплаву і властивостями сплавів

Визначення зв'язку властивостей сплавів з типом діаграми стану є важливою передумовою для створення нових сплавів і прогнозування їх властивостей. Такий зв'язок вперше досліджено Миколою Курнаковим. Зміни властивостей сплавів залежно від типу діаграми стану двокомпонентних систем представлено на рисунку 6.10.

Властивості сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані, що утворюють механічні суміші у твердому, змінюються за прямолінійним законом (рис. 6.10, а). Тому створити сплав у цій системі, механічні і електричні властивості якого б перевищували властивості вихідних компонентів, неможливо.

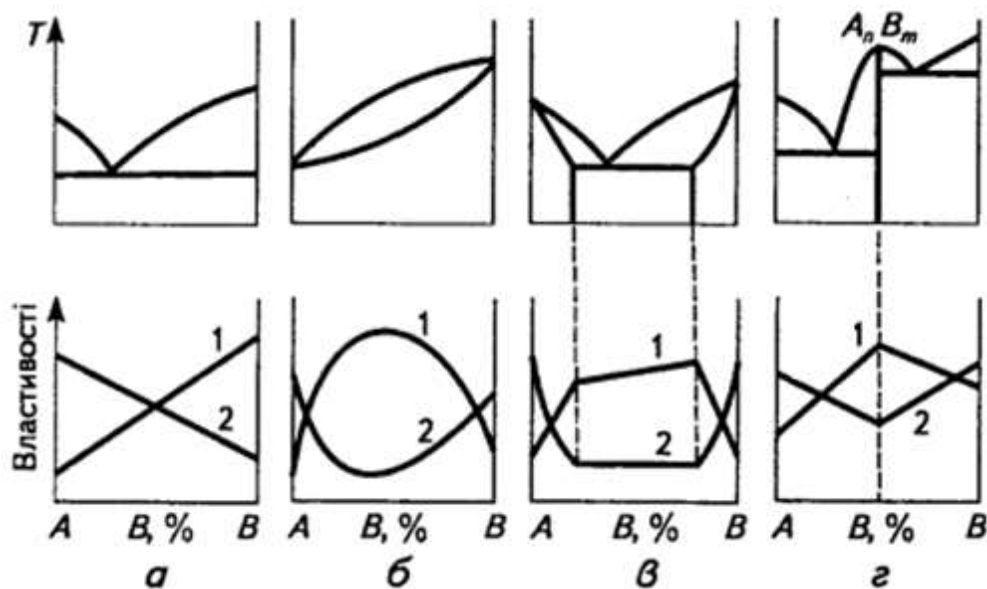


Рис. 6.10 - Діаграми стану та властивостей сплавів (за М. С. Курнаковим):
1 - твердість; 2 - електропровідність: а - діаграма I типу; б - діаграма II типу; в -
діаграма III типу; г - діаграма IV типу.

У разі утворення компонентами необмежених твердих розчинів, властивості сплавів змінюються нерівномірно за криволінійним законом (рис. 6.10, б), і можуть значно відрізнятись від властивостей вихідних компонентів.

У сплавах з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані властивості змінюються відповідно до належності сплаву до певної частини діаграми стану (рис. 6.10, в).

Утворення в системі хімічних сполук (рис. 6.10, г) супроводжується стрибкоподібною зміною властивостей сплавів. Точка перелому на діаграмі стану відповідає утворенню хімічної сполуки.

Отже, показано, що між станом сплавів та їх властивостями існує певний зв'язок. Проте, описані залежності зміни властивостей від типу діаграми стану – це лише наближена схема, що не завжди підтверджується експериментом. У ній не враховується форма та розмір кристалів, їх взаєморозташування, температура та інші фактори, що значною мірою впливають на властивості сплавів будь-якої системи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що являє собою діаграма стану сплавів?
2. Які методи застосовують для побудови діаграм стану сплавів?
3. Які точки на кривих нагрівання чи охолодження називають критичними?
4. Поясніть значення термінів: евтектика, солідус, ліквідус.
5. Яка лінія на діаграмі називається сольвус?
6. Покажіть на діаграмі стану сплавів ці лінії та точки.
7. Чим пояснюється зміна швидкості охолодження сплаву?
8. Який з досліджених сплавів є евтектичним? доевтектичним? заевтектичним?

9. Охарактеризуйте евтектичний сплав. Яке перетворення називається евтектичним?
10. Сформулюйте і запишіть правило важеля. Сформулюйте правило фаз.
11. Поясніть, як виглядають діаграми стану систем:
- з необмеженою розчинністю компонентів;
 - з цілковитою нерозчинністю компонентів;
 - з обмеженою розчинністю компонентів;
 - з хімічними сполуками;
12. З яких фаз складається мікроструктура доевтектичного складу?
13. З яких фаз складається мікроструктура заевтектичного складу?
14. З яких фаз складається мікроструктура евтектичного складу?
15. Поясніть характер зміни властивостей сплавів за допомогою правила Курнакова.

ЛЕКЦІЯ 7

ДІАГРАМИ СТАНУ СПЛАВІВ З УТВОРЕННЯМ ХІМІЧНОЇ СПОЛУКИ

При високих температурах компоненти більшості промислових сплавів розчиняються один в одному у будь-яких співвідношеннях, утворюючи необмежені рідкі розчини. Область рідкої фази, яку позначається літерою Р або L, розташовується вище лінії ліквідус, що відповідає рівноважній температурі початку кристалізації сплавів різного складу. При переході у твердий стан характер взаємодії компонентів, у більшості випадків, змінюється і в структурі сплавів з'являються різноманітні тверді фази. Основними різновидами цих фаз можуть бути кристали чистих компонентів, тверді розчини та проміжні фази.

Твердими розчинами називають такі фази, при утворенні яких зберігається тип кристалічної решітки одного з компонентів (розчинника), а атоми компонента, що розчиняється, розташовуються в цій решітці, заміщаючи у вузлах атоми основного металу (розчини заміщення) або впроваджуючись у міжвузельні порожнини решітки (розчини проникнення).

Проміжними фазами називають кристали, що містять обидва компоненти і мають власний тип кристалічної решітки, який відрізняється від решіток компонентів. Розташування атомів (іонів) у вузлах кристалічної решітки проміжних фаз може бути як неупорядкованим, так і частково або повністю упорядкованим. В залежності від природи взаємодіючих атомів в проміжних фазах реалізуються різні типи міжатомних зв'язків, що обумовлює широку різноманітність властивостей цих твердих фаз.

Як і тверді розчини, проміжні фази мають змінний хімічний склад. У багатьох випадках інтервал концентрацій, який вони займають, є надто вузьким і не перевищує декількох відсотків. Змінення складу проміжних фаз відбувається або шляхом упровадження атомів малих розмірів у вузельні

порожнини кристалічної решітки, або завдяки виникненню вакантних вузлів. В іншому випадку створюється так званий розчин віднімання.

Окремим випадком проміжних фаз є хімічні сполуки (рис. 7.1, 7.2). Ці фази утворюються при певних концентраціях компонентів, котрі наводять у вигляді стехіометричних формул типу A_mB_n , де m та n цілі числа. На діаграмах стану хімічні сполуки зображають вертикальними прямими, які перетинають вісь концентрацій у точках, що відповідають складу сполуки.

Проміжні фази та хімічні сполуки можуть бути стійкими і нестійкими (рис. 7.3). Стійкими називають фази, які плавляться конгруентно, тобто без змінення хімічного складу. Області розташування стійких фаз на діаграмах стану обмежені зверху лінією ліквідус. Нестійкі фази плавляться інконгруентно, тобто із зміненням складу. В процесі плавлення таких фаз утворюється рідкий розчин і нова тверда фаза. Ця реакція протікає при постійній температурі і знаходить відображення на діаграмі рівноваги у вигляді горизонтальної лінії, котра відовідає верхній межі сталості даної фази.

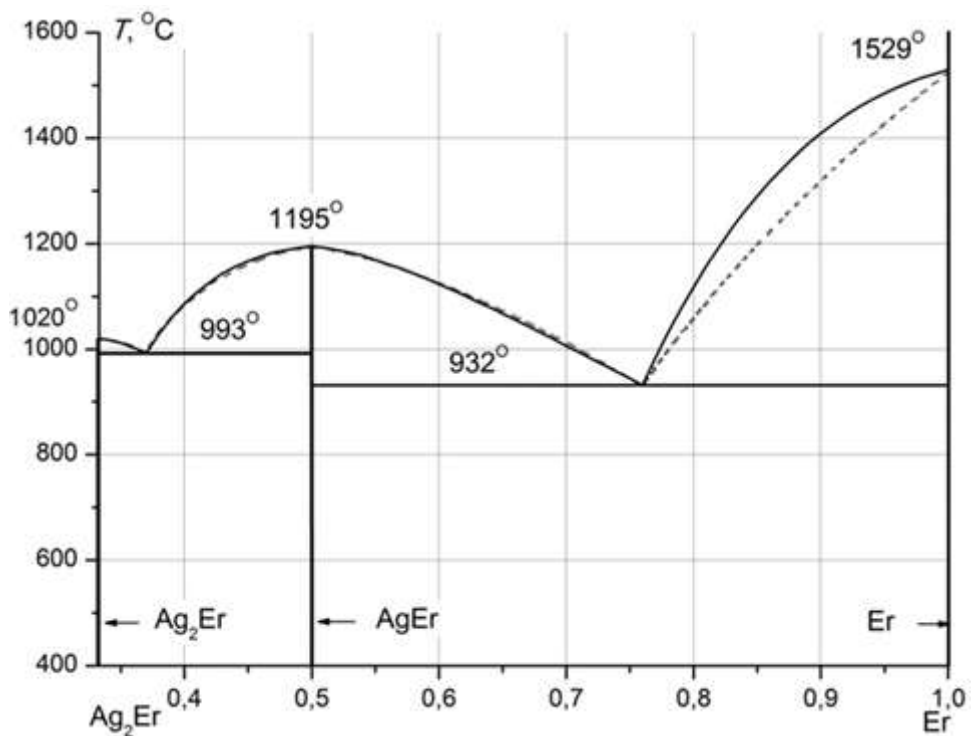


Рис. 7.1. . Діаграма стану системи Срібло-Ербій

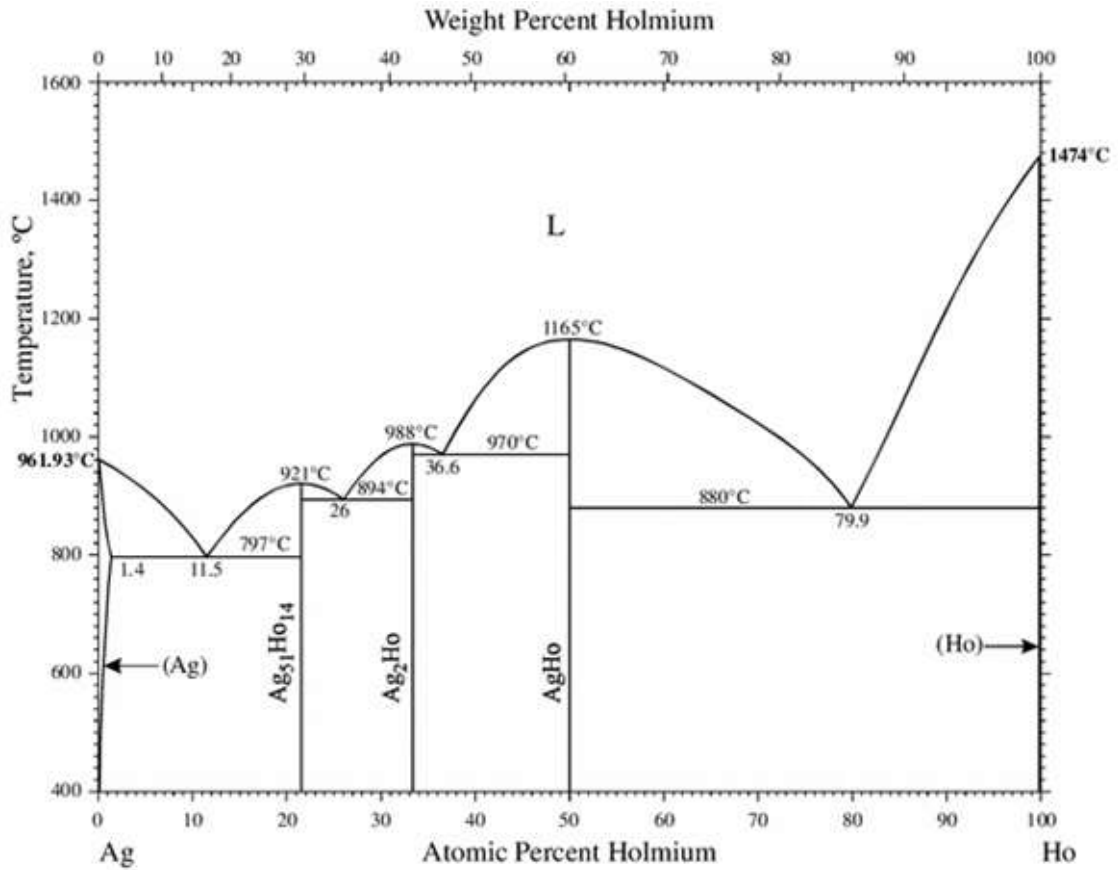


Рис. 7.2. . Діаграма стану системи Срібло-Гольмій

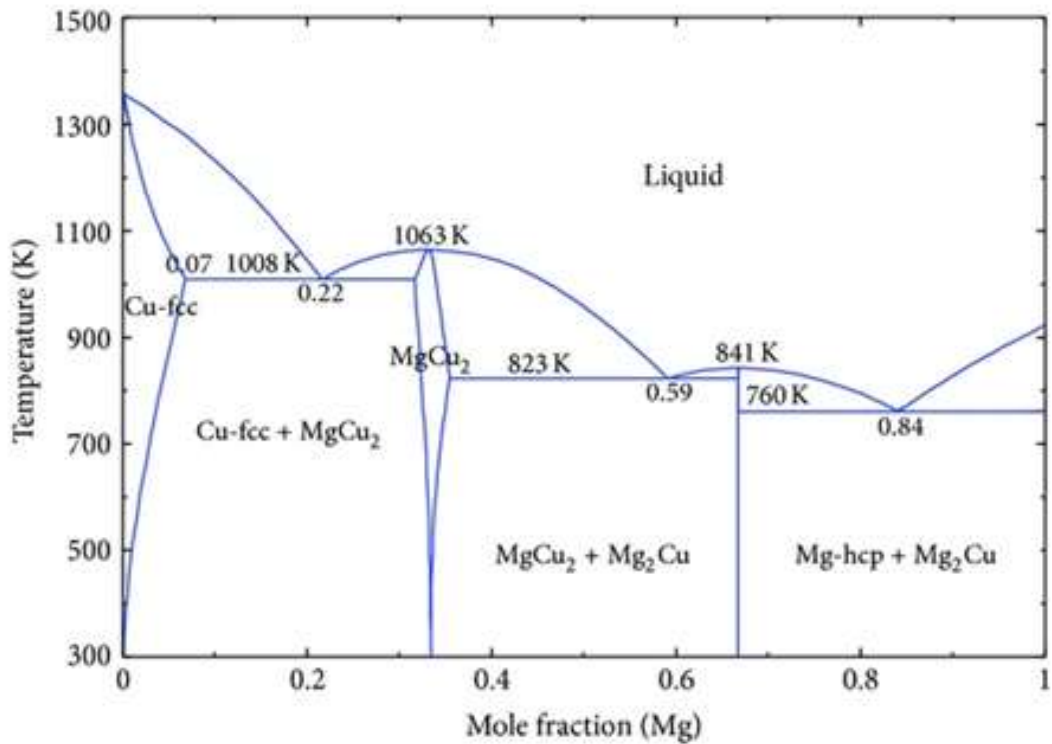


Рис. 7.3. . Діаграма стану системи Мідь-Магній

Дослідження діаграм IV типу

Розглянемо діаграму стану сплавів IV типу, що представлена на рис. 7.4.

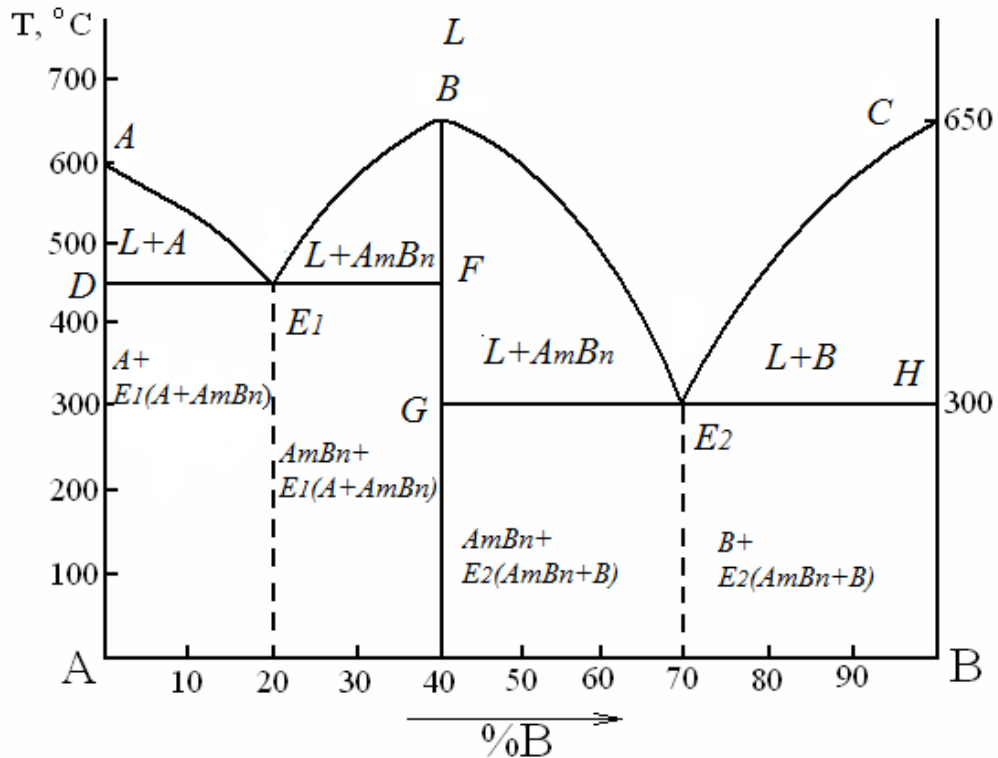
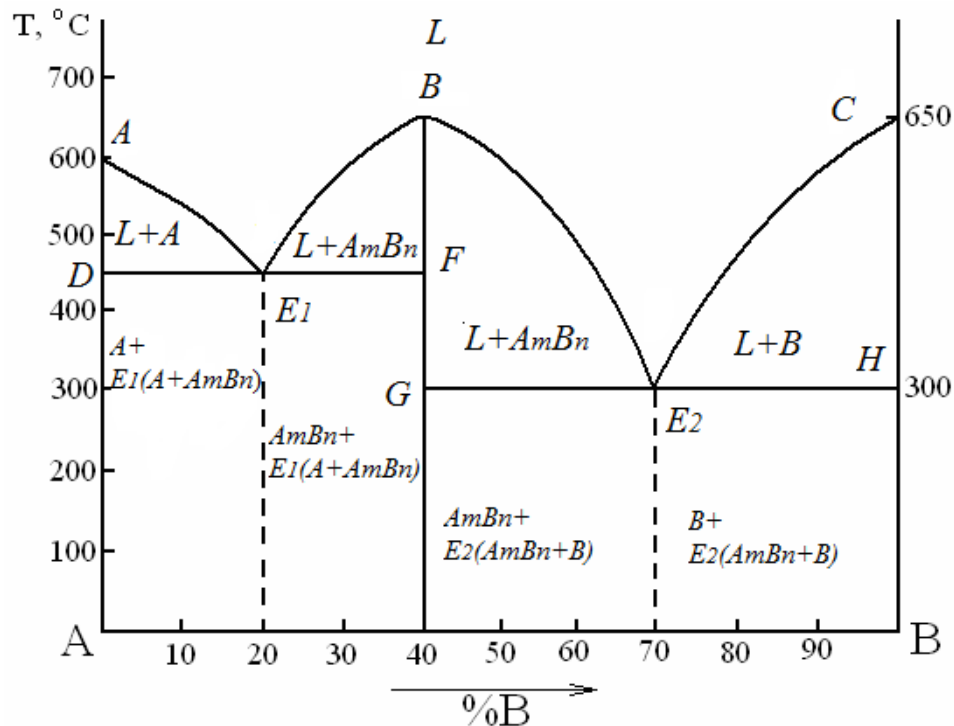


Рис. 7.4

Типові завдання, що виникають при дослідженні діаграм IV типу

1. Описати представлену діаграму (рис.7.4).
2. Визначити за допомогою правила відрізків хімічний склад фаз у заданій точці діаграми та кількісне співвідношення фаз для сплаву, наприклад, 10 % В при температурі 500 °С .
3. Визначити за допомогою правила відрізків хімічний склад сплаву за таких умов, наприклад, масова частка хімічної сполуки $W_{AmBn} = 0,1$; масова частка евтектики $W_{(AmBn+B)} = 0,9$; температура 100°C.
4. Побудувати криву охолодження, наприклад, для сплаву 90 % В і визначити ступінь свободи в точках перегину на кривій охолодження.
5. Знайти число ступенів свободи, наприклад, в точці 50 % В при температурі $t = 500^\circ\text{C}$.

Завдання 1. Описати представлену діаграму.



Розв'язання. Назва діаграми: діаграма стану для сплавів з утворенням стійкої хімічної сполуки $AmBn$ (діаграма IV типу).

Точки діаграми: т. А – температура плавлення чистого компонента А; т. С – температура плавлення чистого компонента В; т. В – температура плавлення хімічної сполуки $AmBn$; т. E_1 – перша точка евтектики; т. E_2 – друга точка евтектики.

Лінії діаграми: AE_1BE_2C – лінія ліквідус; DF і GH – лінії солідус.

Фази: L – рідкий розчин компонентів А і В; А – кристали компонента А; В – кристали компонента В; $AmBn$ – кристали хімічної сполуки $AmBn$;

Структури:

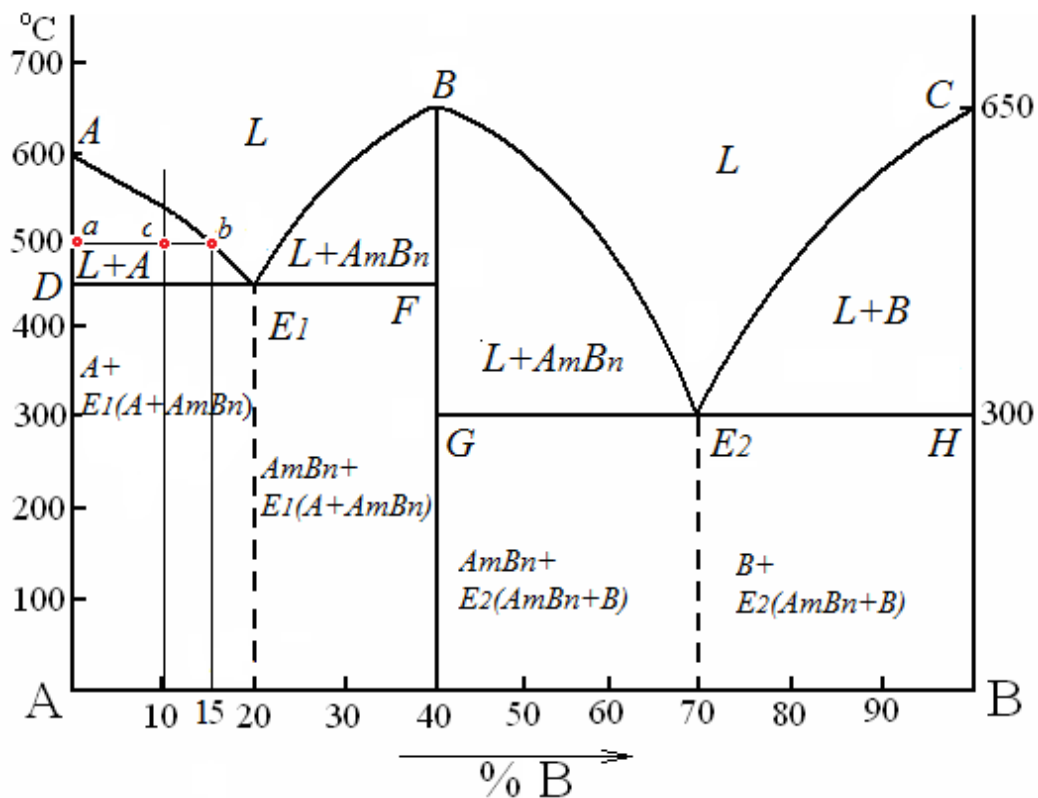
E_1 – перша евтектика – дрібнодисперсна механічна суміш кристалів А і $AmBn$; E_2 – друга евтектика – дрібнодисперсна механічна суміш кристалів $AmBn$ і В.

По лінії AE_1 починається кристалізація компонента А, по лінії CE_2 – компонента В, а по лініях BE_1 і BE_2 – кристалізація хімічної сполуки $AmBn$.

По лініях DE_1F і GE_2H відбуваються евтектичні перетворення.

Завдання 2. Визначити за допомогою правила відрізків хімічний склад фаз у заданій точці діаграми 10 % B, $t = 500^\circ\text{C}$ та масові частки фаз.

Розв'язання. Заданому сплаву 10 % B при температурі 500°C , відповідає точка c на діаграмі. У цій точці дві фази – рідкий розчин L і кристали компонента A . Через точку c , згідно з правилом відрізків, проводимо горизонтальний відрізок – коноду ab до перетину з лініями, які обмежують область $L+A$.



З точок a і b опускаємо перпендикуляри на вісь концентрацій. Точці b , тобто рідкому розчину, відповідає хімічний склад: $C_L = 15\% B$.

Точці a , тобто кристалам компонента A , відповідає хімічний склад: $C_S = 0\% B$ (100% A).

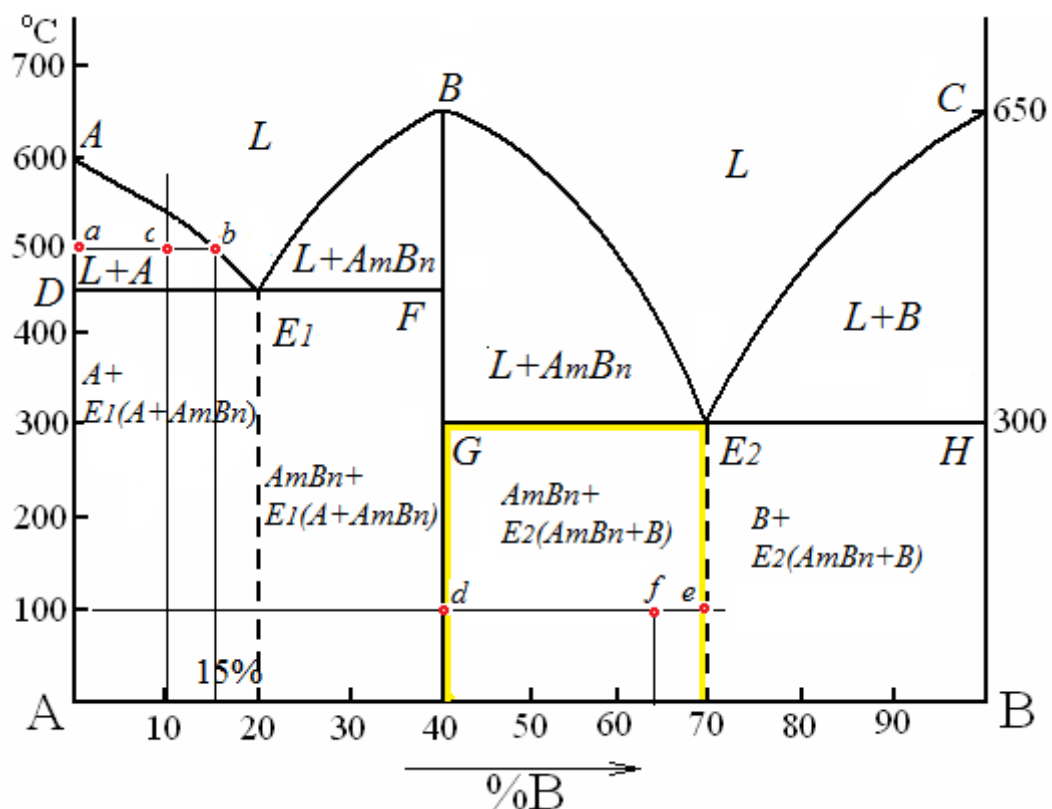
Для визначення масових часток фаз (кількісного співвідношення фаз) складаємо пропорцію і розв'язуємо її, вимірявши довжину відрізків ca , bc , ba . Під час розв'язання необхідно пам'ятати, що при складанні пропорції відрізків, що відповідає даній фазі, – це більш віддалений від неї відрізок, тобто рідкій фазі L відповідає відрізок ca , а твердій фазі (кристалам A) – bc :

$$W_L = \frac{ca}{ba} = \frac{C_{10} - C_S}{C_L - C_S} = \frac{10 - 0}{15 - 0} = 0,67 = 67\%;$$

$$W_S = \frac{bc}{ba} = \frac{C_L - C_{10}}{C_L - C_S} = \frac{15 - 10}{15 - 0} = 0,33 = 33\%.$$

Відповідь: Хімічний склад сплаву 10 % В при температурі 500 °С:
 рідка фаза: $C_L = 15\% B$; тверда фаза: $C_S = 0\% B(100\% A)$; масова частка фаз:
 рідка фаза: $W_L = 67\%$, тверда фаза $W_S = 33\%$.

Завдання 3. Визначити за допомогою правила відрізків хімічний склад сплаву за таких умов: масова частка хімічної сполуки $W_{AmBn} = 0,1$; масова частка евтектики $W_{E_2(AmBn+B)} = 0,9$; температура 100°C.



Це завдання є зворотнім завданню 2, тобто нам задано масові частки і треба знайти точку на діаграмі, якій вони відповідають.

Спочатку знаходимо область діаграми, де присутні кристали хімічної сполуки $AmBn$ і друга евтектика ($AmBn+B$). Ця область знаходиться під відрізком GE_2 . У цій області, при температурі 100 °С, проводимо

горизонтальний відрізок - коноду ed . На цьому відрізку існує деяка точка f , яка відповідає умовам завдання, отже необхідно скласти пропорцію і розв'язати її.

Під час розв'язання необхідно пам'ятати, що при складанні пропорції відрізок, що відповідає даній фазі або структурі, – це більш віддалений від неї відрізок, тобто хімічній сполуці $AmBn$ відповідає відрізок ef , а евтектиці ($AmBn+B$) відповідає відрізок fd :

$$\frac{W_{AmBn}}{W_{AmBn} + W_{E_2(AmBn+B)}} = \frac{ef}{ed};$$

$$ef = \frac{W_{AmBn}}{W_{AmBn} + W_{E_2(AmBn+B)}} ed = \frac{0,1}{(0,1 + 0,9)} (70 - 40)\% B = 3\% B.$$

Хімічний склад сплаву, що відповідає точці f , дорівнює:

$$C_f = 70\% B - ef = 70\% B - 3\% B = 67\% B.$$

Відповідь: Хімічний склад сплаву в точці f : $C_f = 67\% B$; склад хімічної сполуки $C_{AmBn} = 40\% B$; склад евтектики $C_{E_2(AmBn+B)} = 70\% B$.

Завдання 4. Побудувати криву охолодження для сплаву 90 % В і визначити ступінь свободи в точках перетину на кривій охолодження.

Розв'язання. Проведемо вертикальну лінію для заданого хімічного складу 90 % В. Всі точки перетину цієї лінії з лініями діаграми послідовно нумеруємо, перша точка має бути в області L рідкого розчину. При побудові кривої охолодження треба пам'ятати наступне: якщо в даній точці починається кристалізація, то виділяється тепло і охолодження йде повільніше (більш полого ділянка); число ступенів свободи визначається за правилом фаз Гіббса; якщо число ступенів свободи дорівнює нулю, то на кривій охолодження буде горизонтальна ділянка.

На кривій охолодження ділянка 3 - 3¹ – горизонтальна, тобто температура не змінюється, доки весь розплав не перетвориться на другу евтектику.

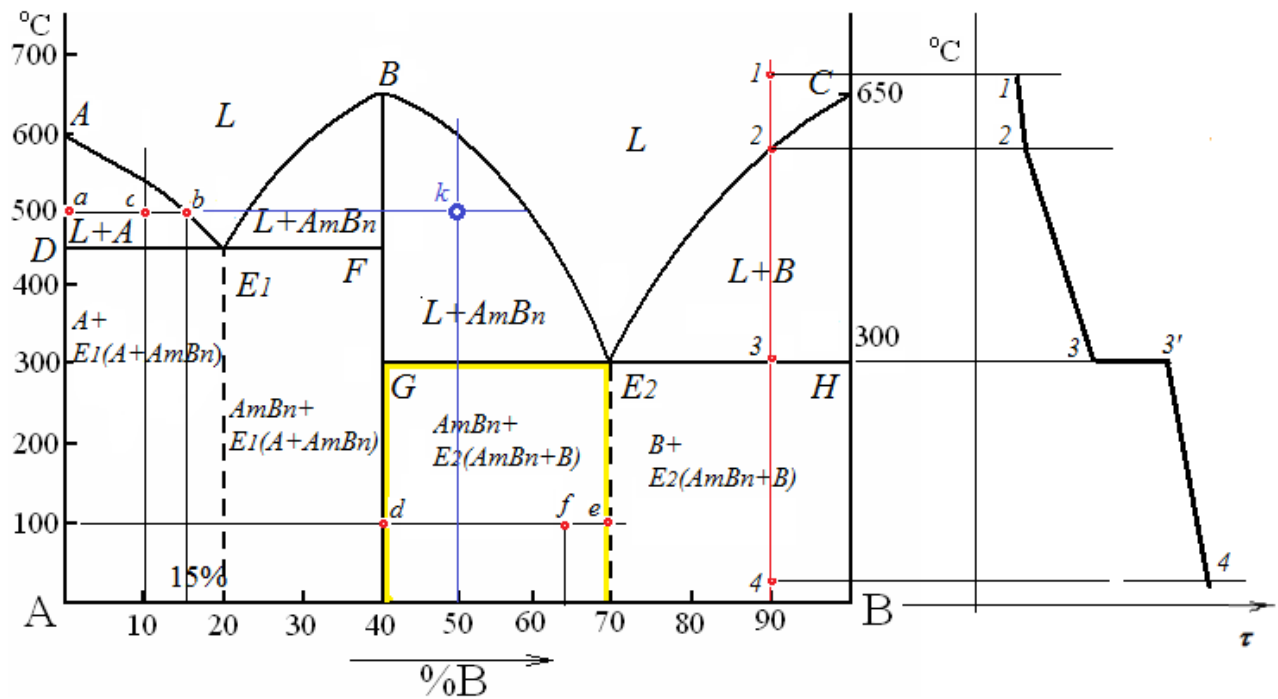
Від т. 3¹ до т. 4 механічна суміш фаз AmBn і B охолоджується.

В точці 4 кількість компонентів $K = 2$, кількість фаз $\Phi = 2$. Число ступенів свободи:

$$C_4 = 2 - 2 + 1 = 1.$$

Відповідь: Ступінь свободи у т. 1, 2, 3, 4: $C_1 = 2$; $C_2 = 1$; $C_3 = 0$; $C_4 = 1$.

Завдання 5. Знайти число ступенів свободи в точці 50 % B при температурі $t = 500^\circ\text{C}$.



Розв'язання. Заданим умовам відповідає точка k , яка знаходиться в області, що окреслена лініями BE_2G . Маємо 2 компоненти (A і B), 2 фази (L і AmBn) і тому ступінь свободи дорівнює:

$$C = 2 - 2 + 1 = 1$$

Відповідь: Ступінь свободи в точці k дорівнює $C = 1$.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Охарактеризуйте діаграму стану системи, компоненти якої утворюють стійку хімічну сполуку.
2. Назвіть спільні риси і відзнаки проміжних фаз і хімічних сполук. Яким чином зображуються ці фази на діаграмах стану?
3. На представлених рисунках укажіть стійку та нестійку хімічні сполуки.
4. Поясніть характер зміни властивостей сплавів за допомогою правила Курнакова.
5. Як впливає на властивості сплавів утворення стійкої хімічної сполуки?
6. Назвіть типові завдання, що виникають при дослідженні діаграми IV типу.
7. Сформулюйте правило відрізків і прокоментуйте його можливості. За яких умов можна використовувати правило відрізків?
8. Сформулюйте правило фаз Гіббса. Наведіть приклади визначення кількості ступенів свободи системи.

ЛЕКЦІЯ 8

ЗАЛІЗО ТА ЙОГО ВЗАЄМОДІЯ З ВУГЛЕЦЕМ

В сучасній техніці найпоширенішими залишаються металеві сплави. В першу чергу, це сплави на основі заліза, що пояснюється широким розповсюдженням заліза у земній корі, відносно низькою вартістю, простотою одержання сплавів і широким спектром їх механічних властивостей.

Визначити структуру сплавів, температури фазових перетворень, вибрати температуру термічної обробки дозволяє діаграма стану Fe-C.

В процесі дослідження системи Fe-C формувались основи металознавства та розвивались методи вивчення сплавів. Історію вивчення діаграми Fe-C можна розглядати як історію металографії.

Початок створення діаграми стану сплавів заліза з вуглецем був покладений Д.К. Черновим у 1868 році із встановленням критичних точок для сталей. У подальшому, із вдосконаленням засобів і методик та розширенням їх достовірності уточнювалися критичні точки для всього спектру залізовуглецевих сплавів, починаючи від чистого заліза і закінчуючи сплавом, що містить 6,67 % вуглецю. Сплави з більшим вмістом вуглецю дуже крихкі і практичного застосування не мають.

При охолодженні залізовуглецевих сплавів вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти із залізом, утворюючи Fe_3C , але й виділятися у вільному стані у вигляді графіту. Тому розрізняють дві діаграми стану: залізо - цементит і залізо - графіт. Сучасна діаграма є подвійною, враховуючи незалежне існування двох різних систем: метастабільної (Fe- Fe_3C) і стабільної (Fe-C). Всі лінії стабільної системи Fe-C розташовані на діаграмі вище ліній метастабільної Fe- Fe_3C .

Вигляд подвійної діаграми стану «залізо–вуглець» наведений на рис.8.1: метастабільний стан Fe- Fe_3C – суцільні лінії, стабільний стан Fe-C – пунктирні лінії. По ординаті відкладено температуру, по абсцисі нанесено дві шкали:

верхня характеризує масовий вміст вуглецю від 0% до 6,67%; нижня – масовий вміст цементиту Fe_3C . **Кількість цементиту у сплаві дорівнює 15-кратному вмісту вуглецю.**

Суттєвих змін залізо-вуглецевий сплав зазнає при переході через точку, що відповідає 2,14 % вуглецю. До 2,14 % вуглецю графіт не виділяється, а після – значна частина вуглецю виділяється у вигляді графіту. Це спричиняє значні зміни у властивостях сплавів. У зв'язку з цим залізовуглецеві сплави розділяють на два види – сталь і чавун. Сталь це залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 0 до 2,14 %. Чавун – це залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 2,14 до 6,67 %.

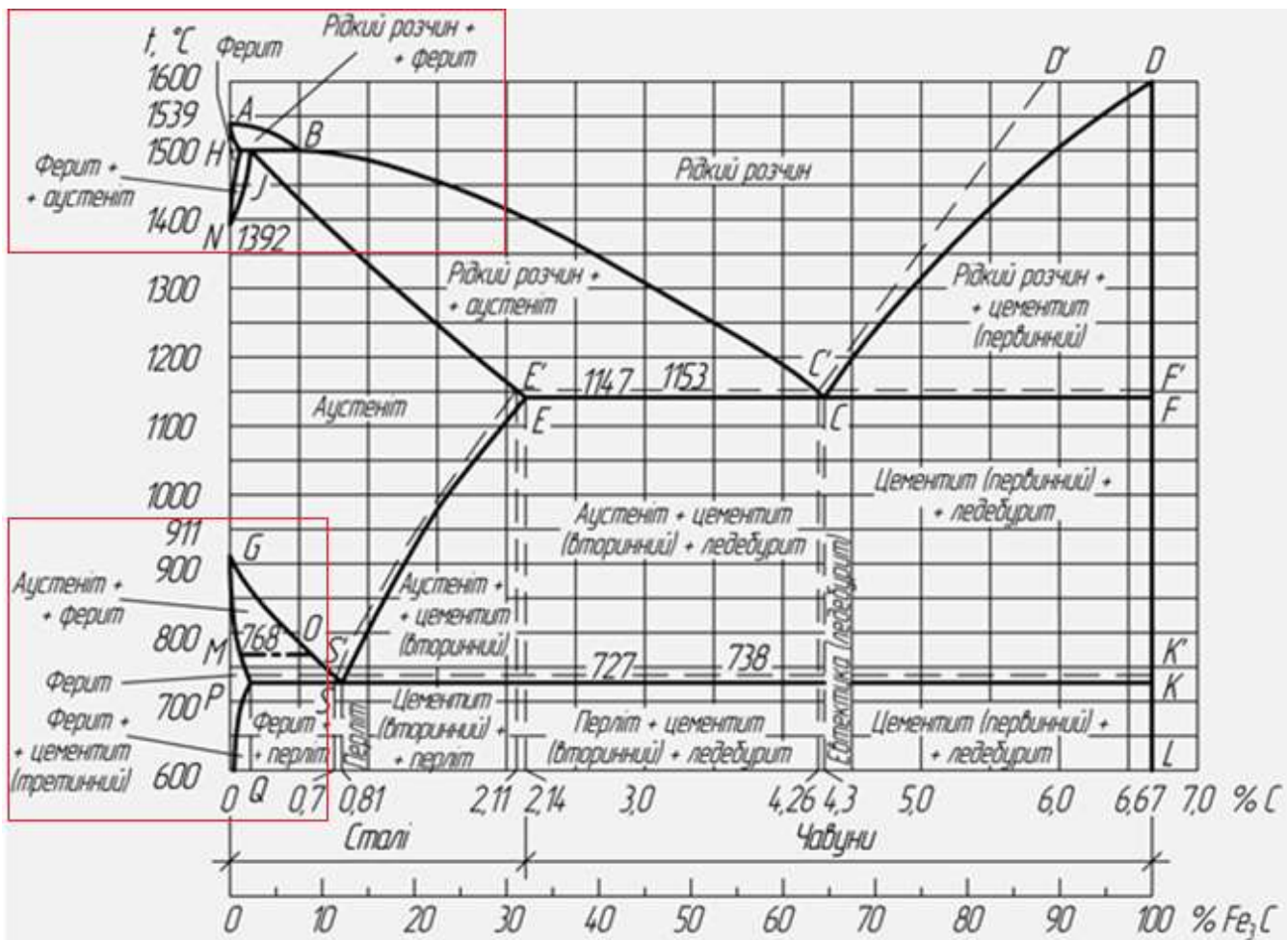


Рис. 8.1. Діаграма метастабільної рівноваги Fe – Fe_3C (суцільні лінії);
діаграма стабільної рівноваги Fe – C (пунктирні лінії C^1D^1 , $\text{E}^1\text{C}^1\text{F}^1$, E^1S^1 , S^1K^1)

Компоненти у сплавах системи залізо–вуглець

Компонентами залізовуглецевих сплавів є два хімічних елементи – залізо і вуглець.

Залізо – метал VIII групи періодичної системи, світло-сріблястого кольору, має густину $7,86 \text{ г/см}^3$ і температуру плавлення 1539°C . Це метал, в якому відбувається температурне поліморфне перетворення. Залізо двічі змінює свою ґратку – при 911°C і 1392°C .

Нижче 911°C залізо має об'ємноцентровану кубічну ґратку (ОЦК). Таке залізо називається α -залізом ($\alpha\text{-Fe}$).

При нагріванні вище 911°C ґратка заліза змінюється на гранецентровану кубічну (ГЦК). В результаті утворюється γ -залізо ($\gamma\text{-Fe}$).

При 1392°C відбувається ще одне поліморфне перетворення: ГЦК-ґратка знову перетворюється на ОЦК, яка зберігається до температури плавлення 1539°C . Високотемпературне залізо з ОЦК-ґраткою називають δ -залізом ($\delta\text{-Fe}$). Під час охолодження відбуваються зворотні процеси перетворення ґраток (рис. 8.2).

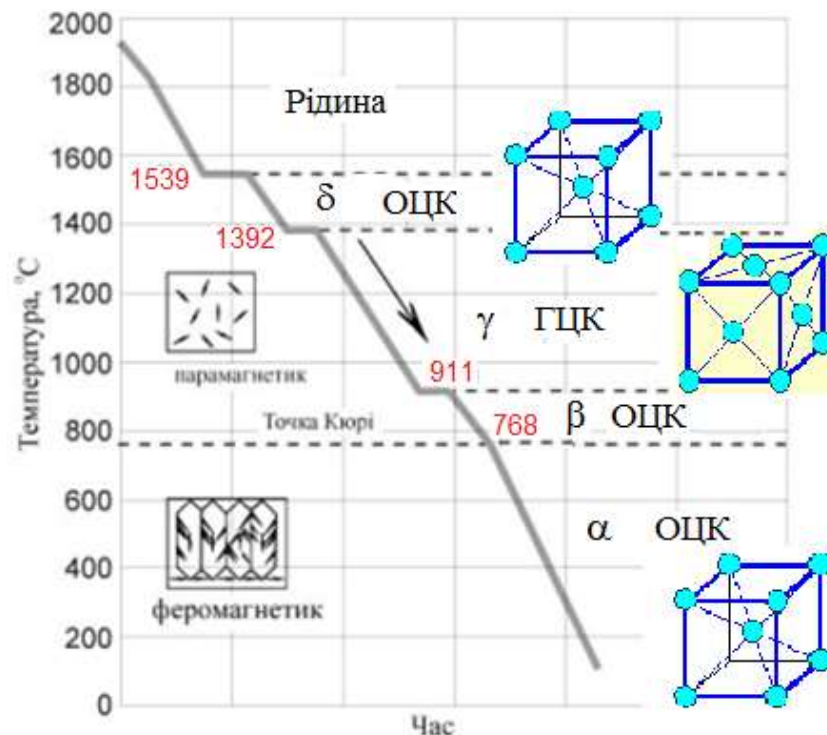


Рис. 8.2. Крива охолодження та критичні точки чистого заліза

При температурі 768°C у залізі відбувається магнітне перетворення (точка Кюрі), що пов'язане з внутрішньоатомними змінами і не викликає перебудови ґратки, а тільки призводить до зміни магнітних властивостей. Тому на кривій охолодження при даній температурі відсутній горизонтальний відрізок. Технічно чисте залізо, яке вміщує до 0,2% домішок, в тому числі до 0,05% вуглецю, має добру пластичність, невисоку міцність і низьку твердість.

Вуглець – неметал, належить до IV групи періодичної системи, існує у природних умовах у вигляді двох полімерних модифікацій: графіту і метастабільної модифікації алмазу.

Графіт має гексагональну пошарову кристалічну ґратку, м'який і невеликої міцності ($\sigma_B=20$ МПа). З підвищенням температури міцність графіту зростає і при 2500°C графіт міцніше всіх тугоплавких металів. Густина графіту $2,25$ г/см³, температура плавлення 3500°C . Графіт поєднує високу жароміцність і кислотостійкість, електропровідність і теплопровідність.

Вуглець у залізовуглецевих сплавах може кристалізуватися у вільному стані у вигляді графіту або взаємодіяти із залізом, утворюючи тверді розчини і хімічну сполуку Fe_3C – цементит.

Фази у сплавах системи залізо-вуглець

Фаза – це однорідна частина системи, що відокремлена від інших частин системи поверхневого розділу, при переході через яку, структура і властивості різко змінюються. **У сплавах фазами можуть бути чисті метали, хімічні сполуки, рідкі та тверді розчини.** Фази відрізняються одна від одної за агрегатним станом, хімічним складом, типом кристалічної ґратки.

В системі залізо-вуглець можлива присутність наступних шістьох фаз:

1. Рідкий розчин Р (L) – однорідна рідина, що складається із заліза та вуглецю, існує як окрема фаза над лінією ліквідус;

2. Твердий розчин проникнення вуглецю у кристалічну ґратку δ -заліза: δ -ферит (δ -Ф);

3. Твердий розчин проникнення вуглецю у кристалічну ґратку γ -заліза: аустеніт (А);

4. Твердий розчин проникнення вуглецю у кристалічну ґратку α -заліза: ферит (Ф);

5. Хімічна сполука заліза з вуглецем Fe_3C : цементит (Ц);

6. Графіт (Г).

В залізобуглецевих сплавах, окрім первинної кристалізації (рідина - тверда фаза), відбуваються процеси вторинної кристалізації у твердому стані, які пов'язані із поліморфними перетвореннями заліза та зменшенням розчинності вуглецю у фериті та аустеніті.

Фази, що отримані з розплаву, називають первинними. Наприклад, якщо із розплаву утворився цементит, то його називають цементит первинний. Якщо ж він утворився із твердої фази (перекристалізація), то його називають вторинним або третинним.

Діаграма стану залізо–цементит

Ферит (Ф)

Твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної ґратки (ОЦК) заліза називають феритом. Високотемпературний δ -ферит (рис.8.3) містить граничну кількість вуглецю - 0,1 % С, що відповідає точці Н.



Рис. 8.3. Ліва верхня частина діаграми

У низькотемпературному α -фериті (рис.8.4) максимальна розчинність вуглецю становить 0,025 % при 727°C, а при зниженні температури зменшується практично до нуля (0,006%). Ферит м'який (80-100 НВ), дуже пластичний і нижче 768°C – магнітний.

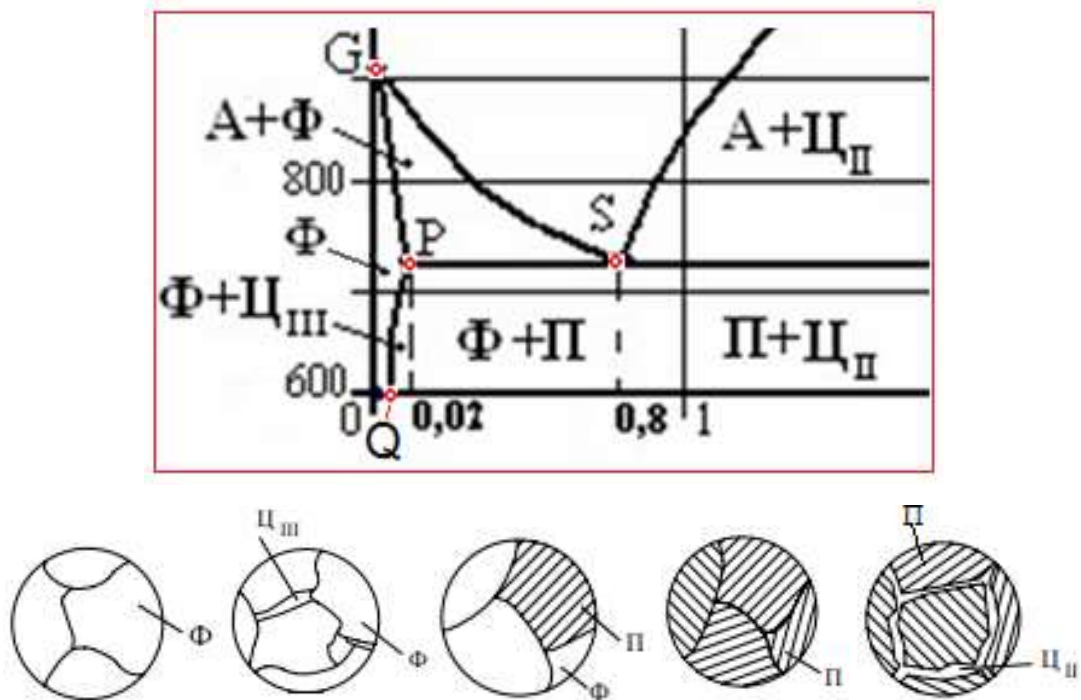


Рис. 8.4. Ліва нижня частина діаграми та структури залежно від стану сплавів

Аустеніт (А)

Твердий розчин проникнення вуглецю на основі гранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК) γ -заліза називають аустенітом. Розчинність вуглецю в γ -залізі при зростанні температури підвищується і досягає максимуму 2,14%С при 1147 °С. Аустеніт пластичний, немагнітний, має твердість 170 НВ.

Цементит (Ц)

Хімічна сполука, яка утворюється в залізобуглецевих сплавах – карбід заліза Fe_3C , називається цементитом. Це найбільш тверда (780 НВ) і крихка фаза в системі залізо - вуглець, нижче 217°C – магнітна. Цементит містить 6,67 % С, має складну **орторомбічну кристалічну ґратку з дванадцятьма атомами заліза і чотирма вуглецю**, температура плавлення становить близько 1250 °С. У сплавах із вмістом вуглецю більше 4,3 %, при охолодженні випадає

у вигляді первинного цементиту вздовж лінії DC діаграми. Вторинний цементит виділяється з аустеніту вздовж лінії ES діаграми, третинний – з фериту вздовж лінії PQ.

Перліт (П)

Евтектоїдна суміш фериту і цементиту (вторинного), яка утворюється із аустеніту при 727 °С і вмісті вуглецю 0,8 %, має назву перліт. Залежно від будови перліту змінюються і його властивості. Так, пластинчастий перліт більш твердий, крихкий та міцніший за зернистий (160-230 НВ; $\sigma_{\text{в}} = 600 - 800$ МПа; відносне видовження 15 - 20%).

Ледебурит (Л)

Евтектичну суміш аустеніту і цементиту (нижче 1147°С і вище 727°С) або перліту і цементиту (нижче 727 °С) називають ледебуритом. Він утворюється при вмісті вуглецю 4,3 % за температури 1147 °С, твердий (800 НВ) і крихкий. Це - структурна складова білих чавунів.

Одразу після твердіння сплави, що лежать ліворуч від точки E (2,14% C), є однорідними і складаються з зерен аустеніту, а ті, що містяться праворуч від точки E, становлять механічну суміш із зерен аустеніту і цементиту. При цьому в сплаві з концентрацією 4,3 % вуглецю (точка C) утворюється однорідна евтектична суміш, яку називають ледебурит (Л).

Отже, точка E поділяє діаграму стану залізовуглецевих сплавів на дві частини. Сплави ліворуч від цієї точки тверднуть відповідно до лінії AE і після затвердіння мають однорідну структуру, що складається з зерен аустеніту. Ці сплави називають сталями. Внаслідок однорідності структури сталі мають високу пластичність, яка дає змогу обробляти їх тиском (куванням, прокатуванням).

У сплавах, що містяться праворуч від точки E, кристалізація закінчується при сталій температурі 1147 °С (лінія ECF) з утворенням евтектики - ледебуриту. Ці сплави називають чавунами. Наявність крихкої та

більш легкоплавкої евтектики не дає змоги обробляти чавуни тиском, проте поліпшує їхні ливарні властивості.

Евтектичне та евтектоїдне перетворення у стабільної системи Fe-C відбуваються за більш високих температур (відповідно 1153 і 738 °C). Точки C, E, S зміщуються ліворуч ($C' = 4,26\%$; $E' = 2,11\%$; $S' = 0,70\%$).

Лінія E'C'F' відповідає температурі утворення графітної евтектики (аустеніт + графіт), лінія P'S'K' – утворенню евтектоїда (ферит + графіт), по лінії E'S' виділяється вторинний графіт.

У вуглецевих сплавах залізо-графіт є стабільною фазою, а цементит - лише відносно стабільною.

Лінії діаграми

Позначення точок на діаграмі стандартизовано. Лінії діаграми – це геометричне місце точок, що характеризують хімічний склад фаз, які знаходяться у рівновазі, температури початку та кінця фазових перетворень.

Лінія ABCD, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів із різним вмістом вуглецю, називається лінією ліквідусу. Вище від лінії ABCD усі сплави перебувають у рідкому стані.

Лінія ANJESCF, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається лінією солідусу. Нижче від лінії ANJESCF усі сплави перебувають у твердому стані.

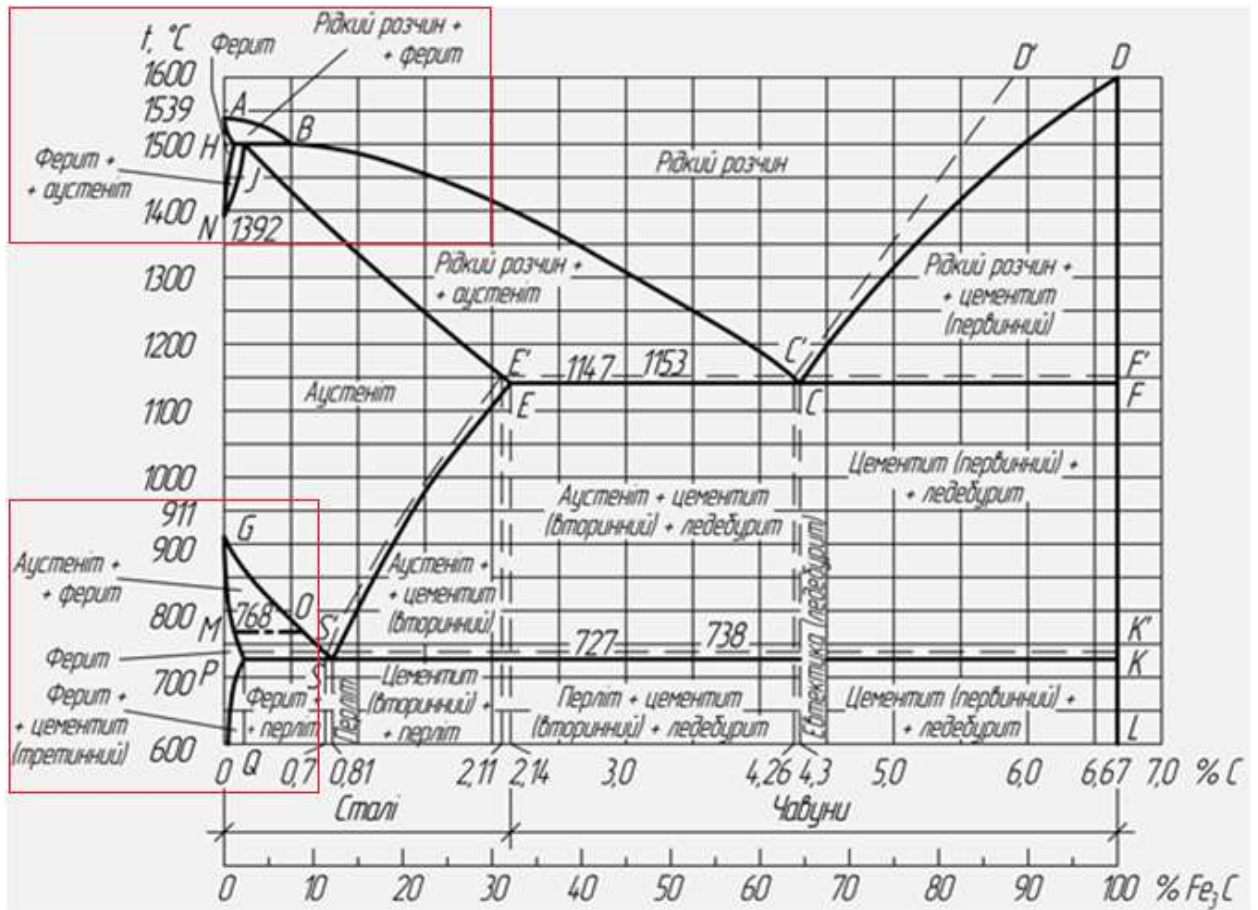
AB і AN – відповідно лінія початку і кінця кристалізації δ -фериту.

BC – лінія початку кристалізації аустеніту.

DC – лінія початку кристалізації первинного цементиту.

NJE – лінія кінця кристалізації аустеніту.

ESCF – лінія евтектичної рівноваги – лінія кристалізації рідкого розчину евтектичної концентрації сплавів в евтектику – суміш аустеніту і цементиту (ледебурит). Евтектичне перетворення відбувається за температури 1147°C для всіх сплавів, що містять понад 2,14 % C.



З охолодженням сплавів нижче від лінії АНJЕСF відбуваються процеси, які супроводжуються поліморфними перетвореннями заліза і зменшенням розчинності вуглецю в α -залізі та γ -залізі.

GS – лінія початку перекристалізації аустеніту у ферит в процесі охолодження.

GP – лінія кінця перекристалізації аустеніту у ферит.

ES – лінія початку кристалізації вторинного цементиту із аустеніту, тобто характеризує зменшення концентрації вуглецю в аустеніті при охолодженні.

PQ – лінія початку кристалізації третинного цементиту з фериту, тобто характеризує зміну концентрації вуглецю у фериті.

PSK – лінія евтектоїдного перетворення, тобто перетворення аустеніту на перліт за температури 727 °C. Сплави на лінії PSK складаються з аустеніту, фериту і цементиту.

Лініями АНН, GPQ і NJESG обмежені відповідно однофазні області δ-фериту, α-фериту та аустеніту.

МО – лінія магнітного перетворення, яке відбувається при 768 °С для сплавів, що містять до 0,6 % С.

Три горизонтальні лінії діаграми відображають такі температурні і концентраційні умови, за яких у рівновазі перебувають три фази.

Лінія НJB при перитектичній температурі 1499°С характеризується наявністю трьох фаз: δ-фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Перитектичне перетворення характерне тим, що із первинного фериту і рідини утворюється аустеніт (твердий розчин проникнення вуглецю у кристалічну ґратку γ - заліза). Перитектичне перетворення відбувається по лінії НJB, тобто починаючи з 0,1 % С і закінчуючи 0,5 % С.

Лінія ECF при евтектичній температурі 1147°С характеризується наявністю трьох фаз: аустеніту, рідини (розплаву) і цементиту.

Лінія PSK при евтектоїдній температурі 727°С характеризується наявністю трьох фаз: фериту, аустеніту і цементиту.

Характерні точки

Точка А відповідає температурі плавлення і кристалізації чистого заліза (1539 °С).

Точка В вказує на вміст вуглецю (0,5 %) у рідкій фазі при перитектичній температурі (1499 °С).

Точка Н відповідає граничній кількості вуглецю (0,1 %) у δ-фазі при перитектичній температурі.

Точка J вказує на вміст вуглецю (0,16 %) в аустеніті, який перебуває в рівновазі з δ-фазою і рідиною при перитектичній температурі.

Точка С – температура плавлення і утворення ледебуриту, вказує на вміст вуглецю (4,3%) у рідкій фазі у стані рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147 °С).

Точка E – максимальна розчинність вуглецю в аустеніті (максимальна насиченість аустеніту вуглецем), відповідає 2,14 % C в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі 1147 °C.

Точка S – відповідає 0,8 % C в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит + цементит) при евтектоїдній температурі (727 °C).

Точка P – максимальна розчинність вуглецю у фериті, відповідає 0,025 % C – граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі.

Точка Q – мінімальна розчинність вуглецю у фериті, відповідає 0,006%С.

Точка D – температура плавлення і кристалізації цементиту (1250°C).

Точка N (1392°C, 0%С) і точка G (911°C, 0%С) – температури поліморфного перетворення в залізі.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які лінії діаграми залізо-цементит відповідають перитектичному, евтектичному і евтектоїдному перетворенням?
2. З якої фази при охолодженні сталі виділяється первинний цементит?
3. По яких лініях діаграми залізо-цементит виділяється цементит первинний, вторинний, третинний?
4. Скільки однофазних областей на діаграмі залізо-цементит?
5. Скільки двофазних областей на діаграмі залізо-цементит?
6. Вказати точки діаграми залізо-цементит, які ділять сплави на сталі і чавуни, доевтектоїдні і заевтектоїдні сталі, доевтектичні і заевтектичні чавуни?
7. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення на діаграмі залізо-цементит?

8. Чим обумовлена наявність на діаграмі декількох областей гомогенних твердих розчинів?
9. Назвіть лінію солідусу на діаграмі залізо-цементит.
10. Які структурні складові залізовуглецевих сплавів складаються з двох фаз?
11. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення на діаграмі залізо-цементит?
12. Вказати для чистого заліза критичні температури: точка магнітного переходу, поліморфне перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$, поліморфне перетворення $\gamma \rightarrow \delta$.
13. Який максимальний вміст вуглецю у фериті для високотемпературної та низькотемпературної кристалічної ґратки?
14. З яких фаз складаються заевтектоїдні сталі при кімнатній температурі?
15. З якої фази і по якій лінії діаграми залізо-цементит виділяється цементит третинний?
16. До якого виду чавуну відноситься сплав, що містить 5,1% С?
17. Визначте по діаграмі залізо-цементит, з яких фаз складається сталь з 0,47 % С при температурі 100 і 1000°C?
18. Поясніть, чому діаграма стану залізовуглецевих сплавів має порівняно складний вигляд?
19. Поясніть причину поділення сплавів на діаграмі залізо-цементит на сталі та чавуни.
20. Які алотропічні форми має залізо? У яких температурних інтервалах вони існують в рівноважних умовах?
21. З яких компонентів складається система залізо-цементит? Опишіть їх основні властивості.
22. Яка температура (лінія діаграми залізо-цементит) відповідає перитектичному перетворенню? У чому воно полягає?

23. Яка форма графіту найбільш сприятлива з точки зору набуття високих механічних властивостей?
24. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення?
25. По представленій діаграмі стану Fe-Fe₃C вказати основні лінії, точки і структурно-фазовий склад усіх областей діаграми.
26. На метастабільній (Fe-Fe₃C) діаграмі позначити точки, концентрації, температури, структури та фази. Дати характеристику всім лініям на діаграмі.
27. Які поліморфні перетворення відбуваються в залізі? Вказати температури.
28. Що таке ферит, аустеніт, цементит, перліт і ледебурит? Вказати тип їх кристалічної ґратки.
29. Описати лінії діаграми Fe-Fe₃C та сутність перитектичного, евтектичного та евтектоїдного перетворень.
30. Як визначити у заданому сплаві при вказаній температурі масову частку фаз та їх хімічний склад?
31. Які перетворення проходять при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдному, заевтектоїдному, доевтектичному, евтектичному або заевтектичному сплаві?

ЛЕКЦІЯ 9

ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ

Залізовуглецеві сплави розділяють на два види – сталь і чавун.

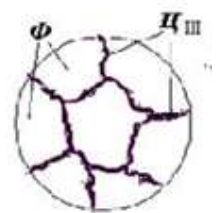
Сталь це залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 0 до 2,14 %.

Чавун – це залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 2,14 до 6,67 %.

Сталі, в залежності від вмісту вуглецю, по рівноважній структурі поділяються на:

- технічне залізо ($C \leq 0,02 \%$);
- доевтектоїдні сталі ($0,02 < C < 0,8 \%$),
- евтектоїдні сталі ($C = 0,8 \%$);
- заевтектоїдні сталі ($0,8 < C \leq 2,14\%$).

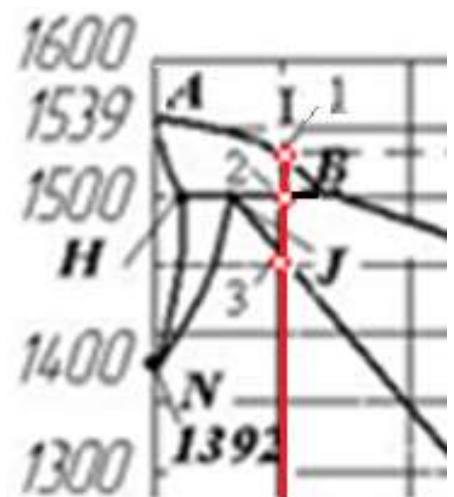
Технічне залізо. У структурі технічного заліза присутній ферит і третинний цементит, останній виділяється при охолодженні сплаву нижче $727 \text{ }^\circ\text{C}$ із фериту.



Доевтектоїдні сталі

Про фазові перетворення можна судити з кривих їх охолодження або нагрівання. Як приклад, розглянемо процес структуроутворення у доевтектоїдної сталі з 0,4% вуглецю (рис. 9.1, крива охолодження I, точки 1-6).

Вище точки 1 сталь знаходиться у рідкому стані. В інтервалі температур 1-2 із рідкої фази, склад якої змінюється по ліквідусу АВ, випадають кристали δ -фериту, склад яких визначається по солідусу АН. При кристалізації виділяється теплота, що



призводить до зниження швидкості охолодження сплаву в інтервалі температур 1-2. За правилом фаз:

$$C = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (t \neq \text{const}).$$

В точці 2 ($t=1500^{\circ}\text{C}$) на лінії HJB проходить перитектичне перетворення: із рідини і первинного δ -фериту утворюється аустеніт ($L_B + \delta_H \rightarrow A_J + L$ залишок). За правилом фаз:

$$C = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (t = \text{const}).$$

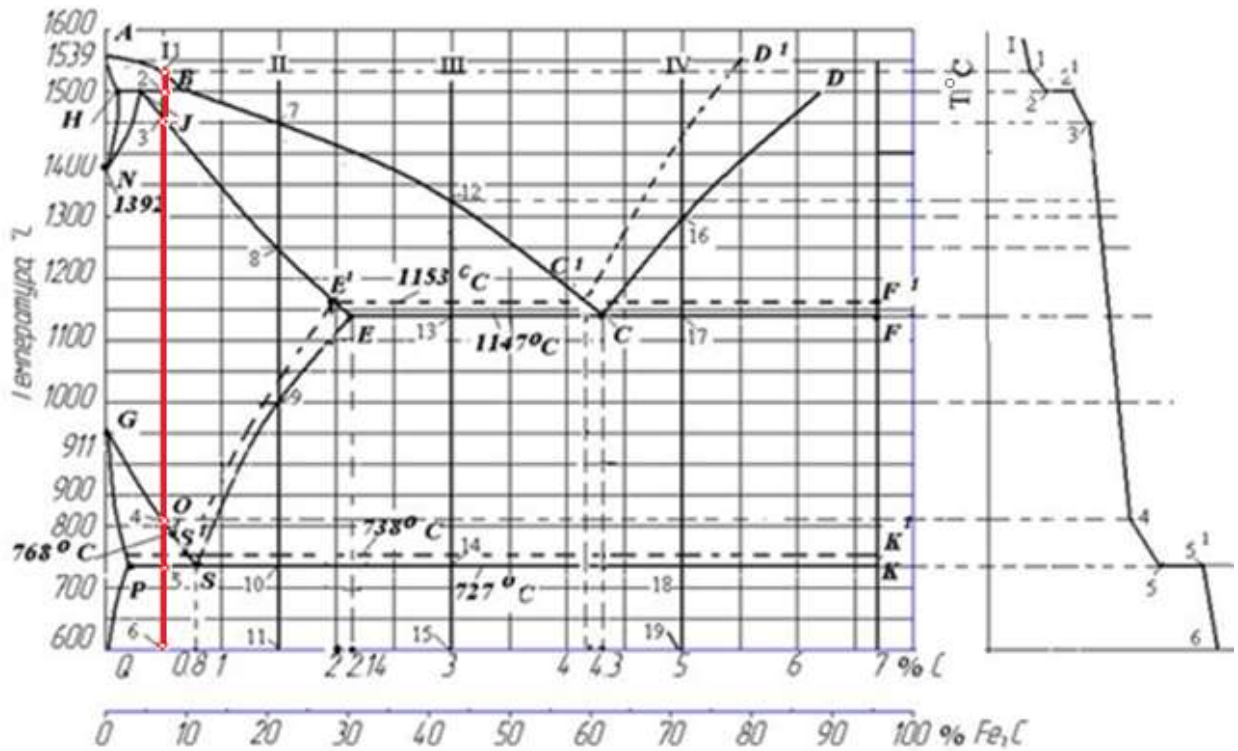


Рис. 9.1. Побудова кривої охолодження для доевтектоїдної сталі з 0,4% вуглецю

В інтервалі температур 2-3 залишкова рідина кристалізується при безперервному охолодженні з утворенням аустеніту (A). В точці 3 на лінії JE закінчується кристалізація аустеніту.

В інтервалі 3-4 сплав безперервно охолоджується і має структуру аустеніту.

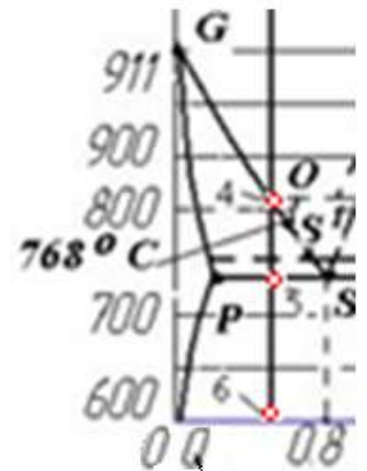
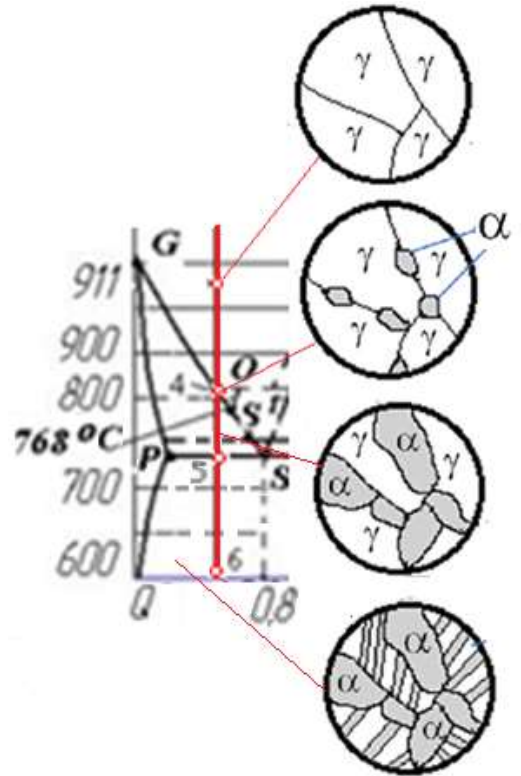
В точці 4 на лінії GS починається перетворення аустеніту в α -ферит, обумовлене поліморфним перетворенням заліза, яке триває в діапазоні температур 4-5, при цьому ГЦК гратка перебудовується в ОЦК і з аустеніту виділяються кристали α -фериту.

При температурі точки 5 по лінії PSK проходить евтектоїдне перетворення $A_{(S)} \rightarrow \Phi_{(P)} + \Pi_{(K)}$, коли з аустеніту, неперетвореного у ферит, утворюється евтектоїд - перліт ($\Phi + \Pi$). В процесі подальшого охолодження сплаву з фериту виділяється третинний цементит (Π_{III}), який нашаровується на перлітному цементиті. Структура сталі, що охолоджена нижче температури точки 5 (до точки 6): ферит + перліт ($\Phi + \Pi$).

Ферит – твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної гратки. Перліт - евтектоїдна (механічна) суміш фериту і цементиту (вторинного), яка утворюється із аустеніту при 727°C і вмісті вуглецю 0,8 %. Масові частки фериту й перліту, як структурних складових сталей, можуть бути визначені за правилом відрізків. Наприклад, при 600°C :

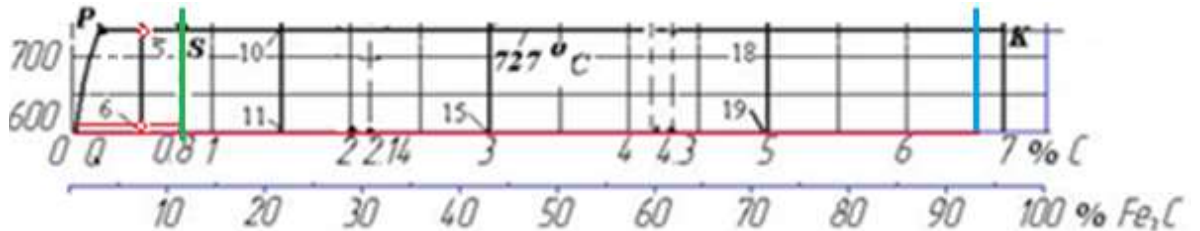
$$\text{Масова частка фериту } W_{\Phi} = \frac{0,8 - 0,4}{0,8 - 0,01} \approx 0,51.$$

$$\text{Масова частка перліту } W_{\Pi} = \frac{0,4 - 0,01}{0,8 - 0,01} \approx 0,49.$$



Масова частка фериту як фази, що існує разом із цементитом складає:

$$W_{\phi}^{\text{II}} = \frac{6,67 - 0,4}{6,67 - 0,01} \approx 0,94 = 94\% , \text{ решта } 6\% \text{ належать – цементиту.}$$



Таким чином, структура, що містить 0,4% С, складається з 51% фериту і 49% перліту. У сплаві, що містить 0,4% С, в рівновазі знаходяться дві фази з масовими частками фериту 94 % і цементиту 6 %.

Заевтектоїдні сталі

Розглянемо процес структуроутворення у заевтектоїдній сталі з 1,5% вуглецю (рис. 9.2, крива охолодження II, точки 7-11). Вище точки 7 сталь знаходиться у рідкому стані і охолоджується.

В інтервалі температур від точки 7 до точки 8 з рідкої сталі виділяються зерна аустеніту. Після закінчення кристалізації від температури точки 8 до точки 9 в аустенітній області відбувається просте фізичне охолодження однофазного сплаву. Оскільки лінія ES – лінія сольвусу, тобто лінія обмеженої розчинності вуглецю в γ -Fe (аустеніті), то **нижче від точки 9 аустеніт стає перенасиченим вуглецем. Надлишкові атоми вуглецю виходять із ґратки аустеніту, зв'язуються з атомами заліза у хімічну сполуку – цементит.** Такий цементит визначають як вторинний (Ц_{II}). Він виділяється по межах аустенітних зерен у вигляді тонкого прошарку. При охолодженні до 727 °C кількість вуглецю в аустеніті зменшується до 0,8 % (від точки 9 до точки S по лінії ES) і такий аустеніт при температурі точки 10 перетворюється на перліт. Структура всіх заевтектоїдних сталей – темні зерна перліту, що оточені світлими прошарками вторинного цементиту.

Схеми структур сталей представлено на рисунку 9.3.

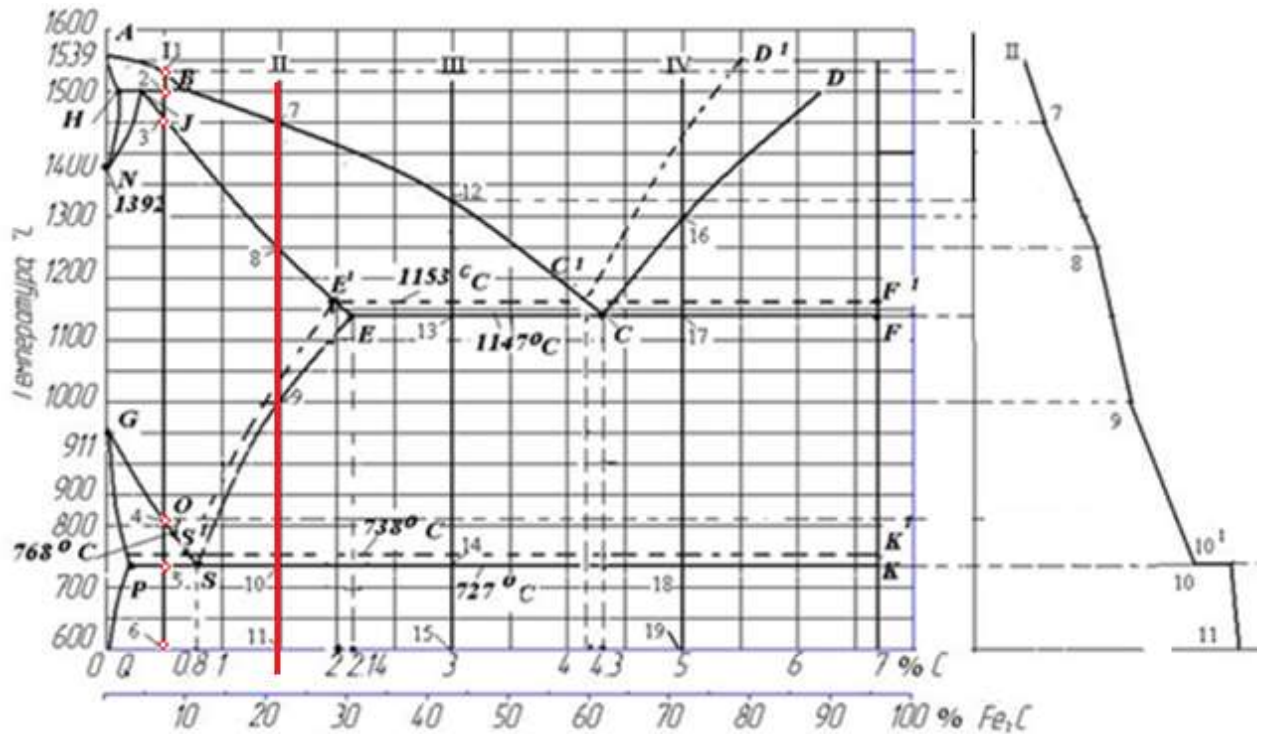


Рис. 9.2. Побудова кривої охолодження для заевтектоїдної сталі з 1,5 % вуглецю

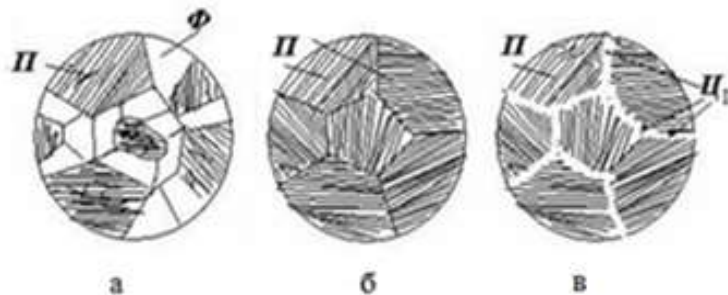


Рис. 9.3. Схеми структур сталей: а – доевтектоїдної; б – евтектоїдної; в – заевтектоїдної

Доевтектичні чавуни

В доевтектичних чавунах (сплав III, рис. 9.4, точки 12-15) первинна кристалізація відбувається в інтервалі температур між точками 12 і 13 з виділенням аустеніту. При температурі точки 13 (1147 °C) проходить евтектичне перетворення $P_C \rightarrow L (A_E + C_F)$. Це перетворення відбувається при постійній температурі (див. криву охолодження сплаву III). Згідно з правилом фаз:

$$C = 2 - 3 + 1 = 0.$$

Після закінчення цієї реакції структура сплаву буде складатися з аустеніту та ледебуриту. При зниженні температури з 1147°C до 727°C (точка 14) із аустеніту, в якому було 2,14 % С, за рахунок зменшення розчинності вуглецю до 0,8 % (точка S), виділяється вторинний цементит Ц_2 , що розміщується навколо зерен аустеніту. Такий вторинний цементит виділяється також і з аустеніту, що входить до складу ледебуриту.

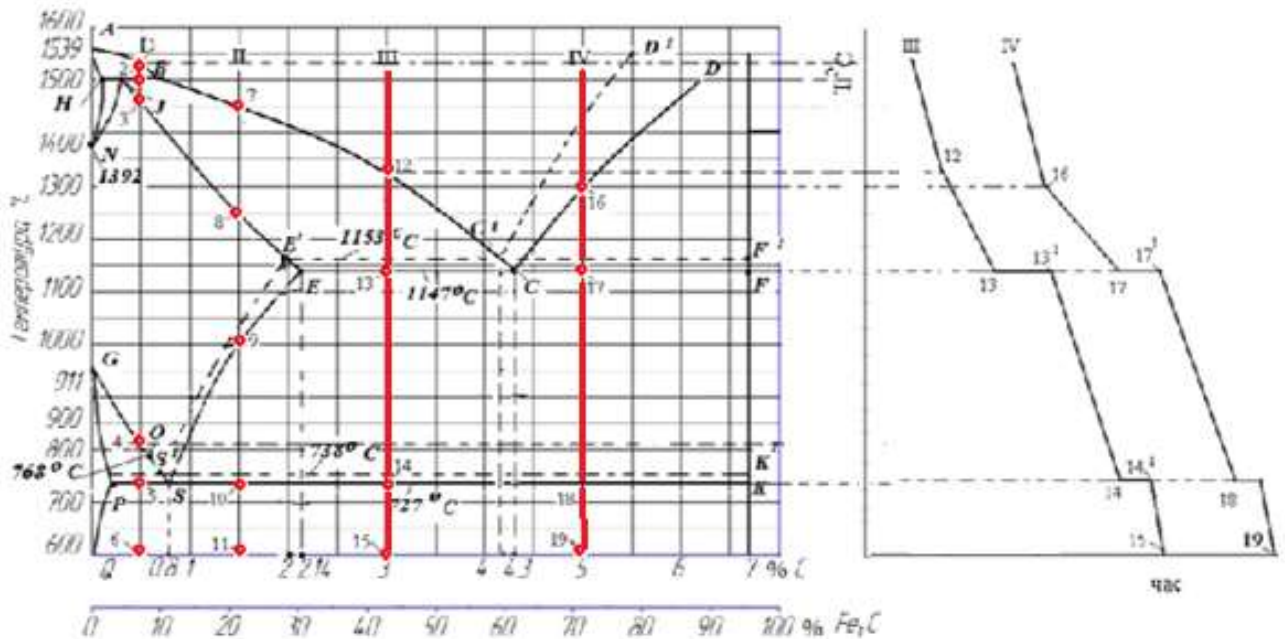


Рис. 9.4. Побудова кривих охолодження для доєвтектичного і заєвтектичного чавунів

При температурі 727°C проходить евтектоїдне перетворення аустеніту (як первинного, так і того, що входив до складу ледебуриту) в перліт ($\text{A} \rightarrow \text{П}$), після завершення якого кінцева структура доєвтектичних чавунів (рис. 9.5, а) буде складатися з перліту (темні зерна) і плямистої структури ледебуриту (темні плями перліту на фоні світлого цементиту). Вторинний цементит зливається з цементитом ледебуриту і як окрема фаза не спостерігається.

Структура *евтектичного чавуну* з 4,3 % вуглецю – суто ледебуритна (рис. 9.5, б).

Заєвтектичні чавуни

Кристалізація заєвтектичних чавунів (сплав IV на рис. 9.4, точки 16-19) починається з виділення в точці 16 кристалів первинного цементиту Ц_1 у

вигляді пластин. При температурі точки 17 (1147 °С) відбувається евтектичне перетворення $P_C \rightarrow L(A_E + \Pi)$, після завершення якого структура буде складатися з ледебуриту і первинних кристалів цементиту. Така структура буде зберігатися аж до кімнатної (точки 19) з тією різницею, що в кінцевому ледебуриті буде не аустеніт, а перліт, який утворився внаслідок евтектоїдного перетворення при температурі точки 18 - 727 °С (рис. 9.5, в). Ці чавуни називаються білими, оскільки у зламі мають білий сріблястий колір, який визначається наявністю у структурі цементиту.

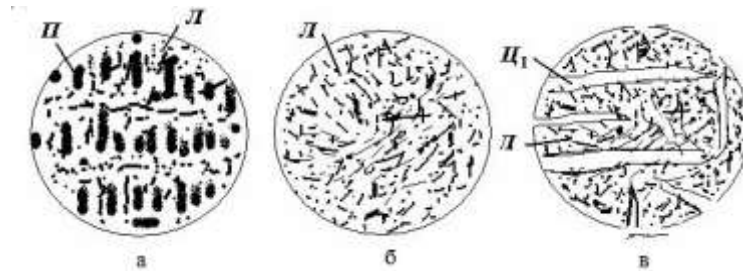


Рис 9.5. Схеми структур чавунів: а – доевтектичного; б – евтектичного; в - заевтектичного

Діаграма стабільної рівноваги, що позначена пунктиром, відображає можливість утворення високовуглецевої фази – графіту на всіх етапах процесу структуроутворення у сплавах з підвищеним вмістом вуглецю. В інтервалі температур ліквідус D^1C^1 – солідус C^1F^1 із рідини виділяється графіт. При евтектичній температурі 1153°С (ізотерма $E^1C^1F^1$) рідина складу C^1 твердне з утворенням графітної евтектики ($A_E + \Gamma$). В інтервалі температур $E^1C^1F^1$ – $P^1S^1K^1$ через зменшення розчинності вуглецю в аустеніті (лінія E^1S^1) виділяється графіт. При евтектоїдній температурі ($t_{PSK}=738^\circ\text{C}$) вміст вуглецю в аустеніті досягає 0,7 % (S^1) і аустеніт розпадається на ферит і графіт. Таким чином, при охолодженні сплавів, які включають 2,14...6,67 % С, формується структура, яка складається з фериту та графіту. Це так звані графітізовані чавуни.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. З якої фази при охолодженні сталі виділяється первинний цементит?
2. По яких лініях діаграми залізо-цементит виділяється цементит первинний, вторинний, третинний?
3. Вказати точки діаграми залізо-цементит, які ділять сплави на сталі і чавуни, доевтектоїдні і заевтектоїдні сталі, доевтектичні і заевтектичні чавуни?
4. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення на діаграмі залізо-цементит?
5. Чим обумовлена наявність на діаграмі декількох областей гомогенних твердих розчинів?
6. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення на діаграмі залізо-цементит?
7. Вказати для чистого заліза критичні температури точки магнітного переходу, поліморфних перетворень $\alpha \rightarrow \gamma$ та $\gamma \rightarrow \delta$.
8. Який максимальний вміст вуглецю у фериті для високотемпературної та низькотемпературної кристалічної ґратки?
9. З яких фаз складаються заевтектоїдні сталі при кімнатній температурі?
10. З якої фази і по якій лінії діаграми залізо-цементит виділяється цементит третинний?
11. Яка температура (лінія діаграми залізо-цементит) відповідає перитектичному перетворенню? У чому воно полягає?
12. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення?
13. Описати сутність перитектичного, евтектичного та евтектоїдного перетворень.
14. Які перетворення проходять при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдному, заевтектоїдному, доевтектичному, евтектичному або заевтектичному сплаві?

ЛЕКЦІЯ 10

ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Термічною називають обробку, що пов'язана з нагрівом і охолодженням металу з метою зміни його структури та властивостей.

Температурні режими термообробки сталей пов'язані з діаграмою залізо-цементит. Рівноважні температури, що відповідають положенню ліній PSK, GS і SE діаграми, позначають критичними точками A_1 , A_3 і A_m відповідно (рис. 10.1).

A_1 - відповідає лінії PSK (727°C) евтектоїдного перетворення: при охолодженні $A \rightarrow \text{П}$, при нагріванні $\text{П} \rightarrow A$;

A_3 - відповідає лінії GS поліморфного перетворення: при охолодженні $A \rightarrow \Phi(\alpha)$, при нагріванні $\Phi(\alpha) \rightarrow A$.

A_m - відповідає лінії SE, тобто температурі початку утворення при охолодженні або розчинення при нагріванні цементиту вторинного в аустеніті.

При нагріванні нерівноважні температури перетворень позначають: A_{C1} , A_{C3} - для доевтектоїдних сталей, A_{cm} - для заевтектоїдних сталей.

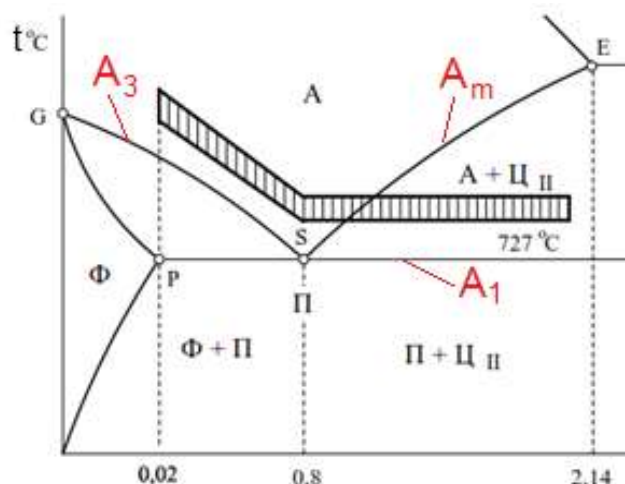


Рис. 10.1. Рівноважні температури, що позначені критичними точками A_1 , A_3 і A_m

При звичайних швидкостях нагріву нерівноважні температури на 30 -50 °С вище за відповідних рівноважних A_1 , A_3 і A_m .

Основними видами термічної обробки сталей є відпал першого та другого роду, гартування та відпуск.

Відпал полягає в нагріві металу, витримці і наступному повільному охолодженні (разом з піччю). Відпал наближає метал до рівноваги.

Відпал першого роду проводять для отримання більш рівноважної структури, ніж початкова. Прикладами відпалу першого роду є рекристалізаційний та дифузійний відпал. При рекристалізаційному відпалі деформаційно зміцнений метал нагрівають трохи вище за температурний поріг рекристалізації. В результаті відпалу матеріал набуває такі ж механічні властивості, які він мав до деформації. Дифузійний (гомогенізуючий) відпал проводять при нагріві до температур, що значно перевищують критичні A_{c3} або A_{cm} (1050 ... 1200 °С), тим самим забезпечуючи інтенсивну дифузію атомів, тривалій витримці (10 -100 год) і повільному охолодженні з виключеною піччю. Такому відпалу піддають виливки для усунення дендритної ліквіації (неоднорідності хімічного складу всередині окремих зерен або в об'ємі сплаву).

При *відпалі другого роду* неодмінно протікає, хоча б часткова, фазова перекристалізація. До відпалу другого роду відносяться неповний відпал і повний відпал. *При неповному відпалі* нагрів ведуть до температури A_{c1} (нижче A_{c3} або A_{cm}). Відбувається часткова перекристалізація сплаву (міняється перлітова складова). Частіше неповний відпал застосовують для заевтектоїдних сталей (сфероїдизуючий відпал). *При повному відпалі* сталь нагрівають до A_{c3} або A_{cm} . Відбувається повна перекристалізація сплаву. Якщо при повному відпалі охолодження нагрітої заготовлі ведуть на спокійному повітрі, то така термічна обробка називається нормалізацією.

Гартування

Гартування полягає в нагріві сплавів вище за температури фазових перетворень і наступному швидкому охолодженні, що фіксує їх високотемпературний стан (істинне гартування) або стан, проміжний між високотемпературним і рівноважним, характерним для нормальної температури.

Теоретична можливість здійснення гартування визначається видом діаграми стану системи, якій належить сплав. Необхідно, щоб при нагріві відбувалася, хоча б часткова, твердофазова перекристалізація. При гартівних швидкостях охолодження дифузійні процеси в металі в значній мірі пригнічені, і отже фазові перетворення відрізняються від рівноважних. Відставання дифузійних процесів у твердій фазі при нерівноважному охолодженні, навіть при кристалізації з рідкого розплаву, призводить до різномірності складу кристалів в центрі і на периферії.

Нагрів сталей при гартуванні (рис. 10.2), як правило, ведуть до температури A_{c3} (доевтектоїдні сталі) і A_{c1} (заевтектоїдні сталі). Якщо нагрів ведеться до температур A_{c3} або A_{cm} , то таке гартування називається *повним*, якщо до A_{c1} - *неповним*.

Якщо при повному гартуванні охолодження нагрітої заготовлі ведуть на спокійному повітрі, то така термічна обробка називається **нормалізацією**.

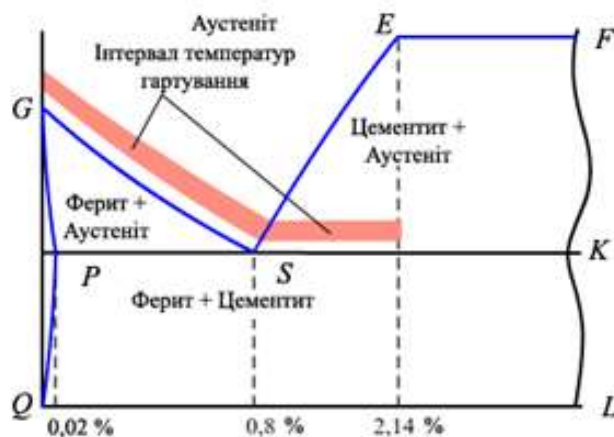
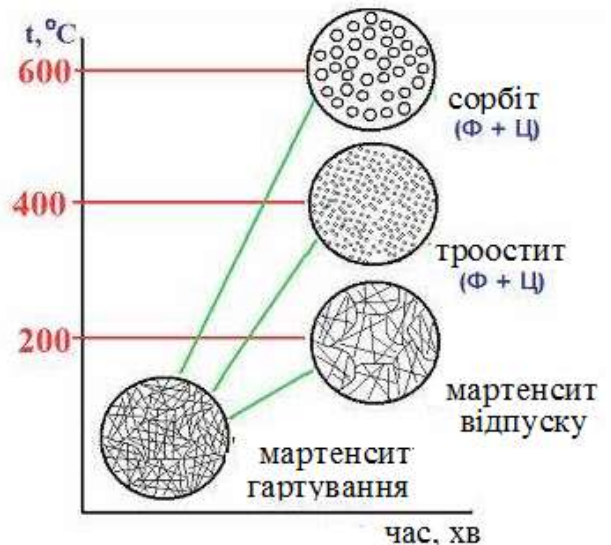


Рис. 10.2. Фрагменти діаграми залізо-цементит з оптимальним інтервалом температур гартування доєвтектоїдних і заевтектоїдних сталей

Залежно від швидкості охолодження існують два принципово різних способу гартування - гартування на феритно-цементитні суміші та гартування на мартенсит.

При охолодженні зі швидкістю нижче критичної, тобто такій мінімальній швидкості, яка потрібна для **утворення мартенситу**, виникають структури перлітового типу (перліт, сорбіт, троостит, бейніт).

Сорбіт і троостит відрізняються від перліту і один від одного мірою дисперсності: троостит більш дисперсний ніж сорбіт, а сорбіт більш дисперсний ніж перліт. Чим структура більш дисперсна, тим вище її механічні властивості.



Охолодження зі швидкістю вище критичною веде до перетворення аустеніту в мартенсит. Суть перетворення полягає в перебудові кристалічної решітки аустеніту (ГЦК) в решітку фериту (ОЦК). При цьому вуглець, розчинений в аустеніті, опиняється повністю в решітці фериту.

Таким чином, мартенсит є пересиченим твердим розчином вуглецю у фериті. Кристалічна решітка мартенситу - тетрагональна (недосконала решітка фериту зі збільшеним параметром c).

Мартенситне перетворення протікає по бездифузійному, зсувному механізму. Під дією напруження, що виникає при швидкому охолодженні сплаву, в кристалічній решітці аустеніту відбувається зрушення по площинах найбільш щільного пакування $\{111\}$ з одночасною перебудовою $\gamma \rightarrow \alpha$.

Особливостями мартенситного перетворення є бездифузійність і орієнтованість - голки мартенситу знаходяться під певними кутами відносно один одного, відповідно до розташування площин і напрямків найбільш щільного пакування в аустеніті.

Мартенситне перетворення не захоплює усю аустенітну структуру. Частина аустеніту зберігається в загартованій сталі. Такий аустеніт **називають залишковим**. Кількість залишкового аустеніту визначається режимами термічної обробки і залежить від температур початку і кінця мартенситного перетворення. **Мартенсит - найтвердіша структура, що утворюється при термообробці сталей. Чим більше в ньому вуглецю, тим він твердіше.**

Заевтектоїдні сталі, на відміну від доевтектоїдних, піддають неповному гартуванню. Це пояснюється тим, що надмірна фаза заевтектоїдних сталей - цементит має високу твердість, і наявність дисперсних включень цементиту підвищує зносостійкість сталі. Нагрів до A_{cm} привів би до розчинення цементиту і, крім того, до укрупнення аустенітного зерна, а, отже, до виникнення після гартування структури крупно-голчастого мартенситу зі зниженими механічними властивостями. Якщо неповному гартуванню піддати доевтектоїдну сталь, то надмірна фаза (ферит), що має малу твердість, знизить механічні властивості загартованого сплаву.

Температура початку мартенситного перетворення не залежить від швидкості охолодження, а визначається складом сплаву.

При температурі *гартування доевтектоїдних сталей* вуглець розподілений між аустенітом і феритом. Якщо не враховувати дуже малого вмісту вуглецю у фериті, можна вважати, що весь вуглець міститься в аустеніті. Тобто, *мартенсит не може містити вуглецю більше, ніж вихідний аустеніт*. Структура загартованої доевтектоїдної сталі майже повністю складається з мартенситу.

При температурі *гартування заевтектоїдних сталей* вуглець розподілений між аустенітом і вторинним цементитом. В цементиті вуглець зв'язаний. Це означає, що в мартенситі стільки вуглецю, скільки у вихідному аустеніті.

Мартенсит - термодинамічно нестійка структура. Нагрів, підвищуючи рухливість атомів, призводить до утворення стійкіших структур (троостит,

сорбіт, перліт). З підвищенням температури знижується твердість і зростає пластичність сплаву.

Відпуск - термічна обробка, що полягає в нагріві загартованої сталі до температури нижче A_1 , витримці і наступному охолодженні з довільною швидкістю. Чим вище нагрів, тим більшою мірою структура наближається до рівноважної. Розрізняють три види відпуску: низький ($t = 150 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$), середній ($t = 350 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$) і високий ($t = 500 - 680 \text{ }^\circ\text{C}$).

Поєднання гартування і високого відпуску називають *поліпшенням*, а сталі (середньовуглецеві), що призначені для такої обробки - поліпшуваними.

В деяких випадках нагрів при відпуску замінюють тривалою витримкою при нормальній температурі. Така обробка називається *старінням*. Якщо старіння проводять з невеликим нагрівом, то його називають *штучним*.

Зазвичай при середньому відпуску утворюється трооститна структура, при високому - сорбіт. Від однойменних структур гартування троостит і сорбіт відпуску відрізняється тим, що цементитні частки в них мають зернисту форму (у структурах гартування - пластинчасту).

Слід розрізняти терміни «гартуваність» і «прожарюваність».

Гартуваність - це здатність металу підвищувати твердість при гартуванні.

Прожарюваність - це глибина, на яку поширюється гартована область. При наскрізній прожарюваності властивості матеріалу однорідні і досить високі по усьому перерізу. Кількісно прожарюваність оцінюється критичним діаметром, під яким розуміють найбільший діаметр прутка, що прожарюються наскрізь (у центрі виникає напівмартенситна структура, що складається на 50 % з трооститу і на 50 % з мартенситу).

Чим більше швидкість тепловідводу (охолодження), тим на більшу глибину прожарюється виріб. Тому критичний діаметр при охолодженні у воді більший, ніж у маслі, і тим більше, ніж на повітрі. Особливо сильно збільшують прожарюваність сталей легуючі елементи (окрім кобальту), що

розчинені в аустеніті. Критичний діаметр залежить від критичної швидкості гартування.

У ряді випадків застосовують гартування, при якому високому нагріву піддають лише поверхневий шар матеріалу (поверхневе гартування). В результаті поверхневого гартування виріб набуває високу поверхневу твердість, серцевина ж залишається в'язкою.

Широко застосовують гартування з індукційним нагрівом струмами високої частоти (СВЧ). Чим вище частота струму, тим тонше шар, в якому індуються струми, і тим тонше виявиться гартований шар. На рисунках 10.3 представлено схеми найбільш поширених режимів термічної обробки сталей.

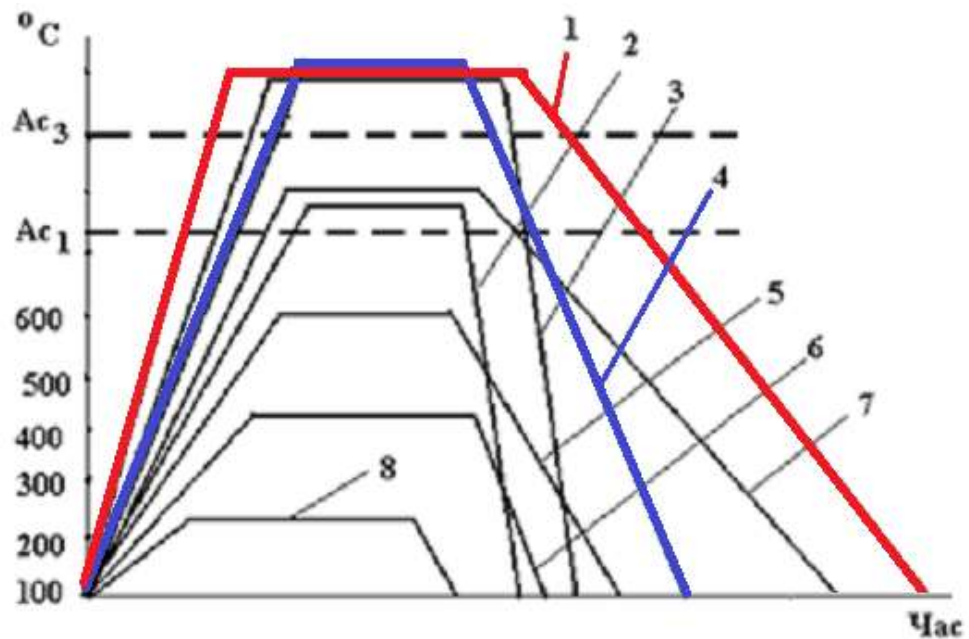


Рис. 10.3. Схеми режимів термічної обробки сталей: 1 – повний відпал; 2 – неповне гартування; 3 – повне гартування; 4 – нормалізація; 5 – високий відпуск; 6 – середній відпуск; 7 – неповний відпал; 8 – низький відпуск.

Графік процесу термічної обробки деталей, виготовлених зі сталей, що містять 0,3 - 0,55% вуглецю, представлено на рис.10.4. При нагріванні сталі до температури гартування, вона стає аустенітною (А). Після гартування сталь має структуру мартенситу (М). При відпуску мартенсит гартування перетворюється в інші структури, а саме, при низькому відпуску –

у мартенсит, при середньому відпуску – у троостит, при високому відпуску – у сорбіт (С).

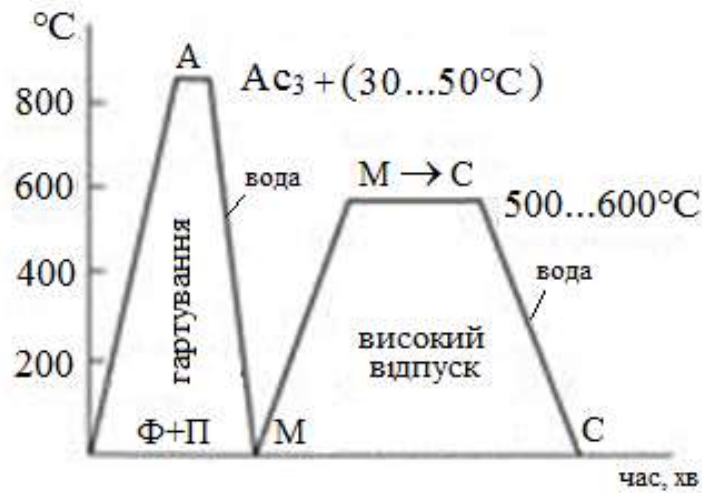


Рис. 10.4 – Графік термічної обробки деталей, виготовлених зі сталей, що містять 0,3 - 0,55% вуглецю

Хіміко-термічна обробка

Обробка, при якій метал нагрівають у спеціальних середовищах, що змінюють хімічний склад поверхневого шару, називається хіміко-термічною (ХТО). Класифікація видів хіміко-термічної обробки сталі представлена на рис.10.5.



Рис. 10.5

Поширеними видами ХТО сталей є цементація (насичення поверхневого шару виробу вуглецем), азотування (насичення азотом), нітроцементація і ціанування (насичення азотом і вуглецем одночасно).

Режими хіміко-термічної обробки, що полягає у дифузійному насиченні металу А компонентом В, визначаються видом діаграми стану системи А-В. Термодинамічно така обробка можлива, якщо в діаграмі є високотемпературна область значної розчинності компонента В в А.

Наприклад, цементація сталей проводиться в аустенітній області діаграми стану Fe-Fe₃C. Цементації піддають низьковуглецеві сталі. В якості середовищ, що насичують (при цементації такі середовища називають *карбюризаторами*), використовують деревне вугілля з добавками вуглецевих солей; вуглецевмісні гази; розплави солей з добавками карбідів. **Максимальне можливе насичення поверхневого шару визначається лінією SE діаграми - лінією граничної концентрації вуглецю в аустеніті.**

Цементована сталь при охолодженні від температури цементації піддається евтектоїдному перетворенню, внаслідок чого насичений вуглецем шар (дифузійний шар) набуває складної структури: на поверхні утворюється перліт + цементит, глибше - перліт і потім - перліт + ферит.

Кінцева мета цементації – отримання високо-твердого поверхневого шару при збереженні в'язкої серцевини, досягається наступним гартуванням і низьким відпуском. Після термообробки поверхневий шар виробу складається з високо-вуглецевого мартенситу, а серцевина - з низьковуглецевого в'язкого мартенситу (при достатній прожарюваності) або зберігає феритно-перлитну структуру доевтектоїдної сталі.

ХТО, що полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару азотом і вуглецем і проводиться у розплавлених солях, що містять групу CN, називають ціануванням.

Якщо насичення азотом і вуглецем здійснюється у газовій фазі, що складається з азото- і вуглецевмісних газів, то така хіміко-термічна обробка

називається нітроцементацією. На рисунку 10.6 представлено температурні режими хіміко-термічної обробки.

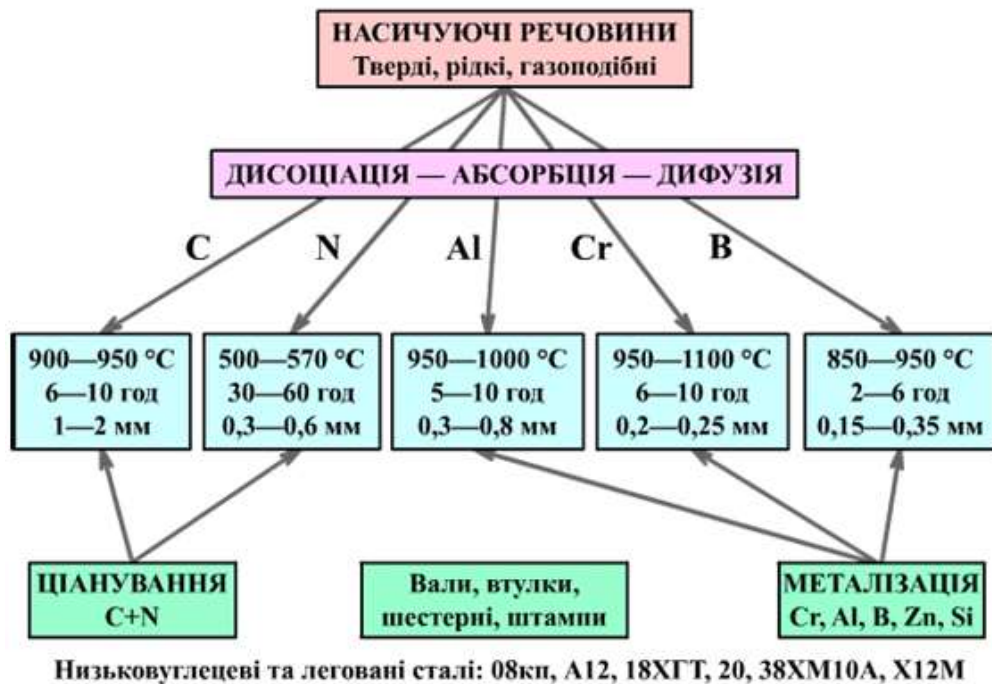


Рис. 10.6

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які лінії на діаграмі стану Fe-C позначаються як A_1 , A_3 , A_m ?
2. Назвіть основні види термічної обробки для сталей?
3. Які види відпалу сталей ви знаєте? З якою метою призначають повний відпал доєвтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі?
4. З якою метою призначають неповний відпал доєвтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі?
5. З якою метою призначають відпал заєвтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі?
6. Дайте визначення термічній обробці, яка називається нормалізацією. До яких температур нагрівають до- та заєвтектоїдні сталі при нормалізації?

7. Які структури можуть утворюватися в сталях при їх різній швидкості охолодження з аустенітного стану?
8. Поясніть суть термічної обробки сталей гартуванням?
9. Яка швидкість охолодження сталей називається критичною?
10. Охарактеризуйте структуру під назвою *мартенсит*.
11. Від чого залежить кількість залишкового аустеніту при гартуванні?
12. До яких температур нагрівають сталі різного хімічного складу при гартуванні?
13. Які види відпуску існують? Для яких сталей призначають низький, середній та високий відпуск?
14. Яка термічна обробка сталей називається поліпшенням?

ЛЕКЦІЯ 11

ЗАГАЛЬНА КЛАСИФІКАЦІЯ СТАЛЕЙ

Найширше розповсюдження, як конструкційні матеріали, отримали сталі. Сталі класифікують на групи за такими ознаками:

- за хімічним складом;
- за якістю (за способом виробництва, ступенем розкислення та вмісту шкідливих домішок);
- за призначенням.

Класифікація сталі за хімічним складом

Розрізняють:

- сталі вуглецеві (ГОСТ 380-94, ГОСТ 1050-88);
- сталі леговані (ГОСТ 4543-71, ГОСТ 5632-72, ГОСТ 14959-79).

В залежності від кількості вуглецю сталі поділяють на:

- безвуглецеві, вміщують менше 0,01% С;
- низьковуглецеві, тобто містять вуглецю менше 0,25%;
- середньовуглецеві, вміст вуглецю складає 0,25 – 0,60%;
- високовуглецеві, в яких концентрація вуглецю перебільшує 0,60%.

Леговані сталі можуть бути:

- низьколеговані – вміст легуючих елементів до 2,5%;
- середньолеговані, в їх склад входять від 2,5 до 10% легуючих елементів;
- високолеговані, які містять понад 10% легуючих елементів.

Сталі поділяють на структурні класи:

- доєвтектоїдні та заєвтектоїдні;
- феритні, мартенситні та аустенітні (для легуваних сталей).

Класифікація сталі за якістю

Залежно від вмісту шкідливих домішок - *сірки і фосфору* - сталі поділяють на:

Сталі звичайної якості – вміщують не більше 0,06% сірки і до 0,07% фосфору. Сталі звичайної якості є найбільш дешевими і уступають за механічними властивостями сталям інших класів, тому що мають збільшену ліквідацію (неоднорідність хімічного складу сплавів, що виникає при їх кристалізації) і кількість неметалевих включень. Їх використовують для невідповідальних деталей.

Якісні сталі – до 0,035% сірки і фосфору кожного окремо. Якісні сталі за хімічним складом вуглецеві або леговані виплавляються киснево-конверторним або мартенівським способом з дотриманням жорстких вимог до хімічного складу, умов плавлення і розливання. Їх використовують для більшості деталей машин і конструкцій.

Високоякісні сталі – до 0,025% сірки і фосфору кожного.

Особливо високоякісні – до 0,025% фосфору і до 0,015% сірки. Високоякісні сталі виплавляються, в основному, в електричних печах, а особливо високоякісні з переплавленням, що гарантує високу чистоту, точний хімічний склад і покращення механічних властивостей, однак ці сталі дорогі. Їх використовують для відповідальних деталей та в спеціальних галузях промисловості.

Сталі звичайної якості та якісні за способом виробництва, в залежності від розкислення, поділяють на:

- спокійні (сп) – повністю розкислені;
- киплячі (кп) – не розкислені;
- напівспокійні (пс) – розкислені частково.

Під розкисленням сталі розуміють процес видалення з розплаву розчинених газів та газових домішок, що погіршують якість сталі.

Класифікація сталі за призначенням

Загальні споживчі властивості вимагають від сталей певного комплексу механічних властивостей, які б забезпечували тривалу і надійну роботу матеріалу в умовах експлуатації і гарних технологічних властивостей. Необхідні технологічні та споживчі властивості, в основному, забезпечуються раціональним вибором хімічного складу, відповідною термічною обробкою і зміцненням.

Марка сталі це її умовне позначення, що відбиває особливості хімічного складу та призначення, допомагає її ідентифікувати та раціонально обрати для конкретних практичних цілей. Частіше за все маркування сталей здійснюється за якістю та за хімічним складом.

За призначенням сталі поділяють на:

Конструкційні, що призначені для виготовлення будівельних і машинобудівних виробів.

Інструментальні, з яких виготовляють ріжучий, вимірювальний, штамповий та інші інструменти. Ці сталі містять більше 0,65% вуглецю.

З особливими фізичними властивостями, наприклад, з певними магнітними характеристиками або малим коефіцієнтом лінійного розширення (електротехнічна стальтощо).

З особливими хімічними властивостями, наприклад, неіржавіючі, жаростійкі або жароміцні сталі.

Вуглецеві та леговані сталі за призначенням можна поділити на:

- вуглецеві конструкційні;
- вуглецеві інструментальні;
- леговані конструкційні;
- леговані інструментальні.

Вуглецеві конструкційні сталі

Ці сталі характеризуються високою пластичністю і зварюваністю, Вони використовуються без зміцнення термічною обробкою для невідповідальних деталей, чи зі зміцненням – для відповідальних. В цих сталях міцність зростає пропорційно збільшенню вмісту вуглецю (числа в марці сталі).

Вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості (табл. 11.1) використовують для виготовлення гарячекатаного рядового прокату: балки, куточки, швелери, двотаври, листи, дрiт; клепані та болтові конструкції будівництва, деталі кроквяних конструкцій; мало навантажені деталі машин.

Сталі звичайної якості позначають буквами "Ст" і умовним номером марки (від 0 до 6) залежно від хімічного складу і механічних властивостей. Чим вище вміст вуглецю, тим більше її номер і тим міцнішою вона є. Буква "Г" після номера марки вказує на підвищений вміст марганцю в сталі.

Приклади маркування вуглецевих конструкційних сталей звичайної якості: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп, Ст6Гпс, Ст6пс, Ст6сп.

- спокійні (сп) – повністю розкислені;
- киплячі (кп) – не розкислені;
- напівспокійні (пс) – розкислені частково.

Під розкисленням сталі розуміють процес видалення з розплаву розчинених газів та газових домішок, що погіршують якість сталі.

Таблиця 11.1 - Сталі вуглецеві конструкційні звичайної якості (ГОСТ 380-94, ДСТУ 2651:2005 / ГОСТ380-2005)

Марка сталі	Вміст елементів, %					Призначення
	C	Mn	Si	≤ P	≤ S	
Ст0	≤ 0,23	-	-	0,07	0,06	Конструкції невідповідального призначення: загородження, прокладки, шайби тощо. Добра зварюваність

Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	0,05	0,04	0,05	Для деталей, що вимагають високої в'язкості та низької твердості: анкерні болти, арматура, тощо. Добра зварюваність.
Ст3сп	0,14-0,22	0,4-0,15	0,15-0,3	0,04	0,05	Балки; ферми; корпуси апаратів, що працюють під тиском; деталі, що підлягають цементації; шестерні, осі тощо. Добра зварюваність.
Ст5Гпс	0,22-0,30	0,8-1,2	0,15	0,04	0,05	Для деталей, що витримують невеликі напруження: вали, осі, серги ресор тощо.
Ст6сп	0,38-0,49	0,5-0,8	0,15-0,30	0,04	0,05	Деталі підвищеної міцності: осі, вали, тяги, пальці траків, шпінделі тощо

Примітка:

1. Цифри при маркуванні не відображають вміст вуглецю в сталі, однак зі зростанням цифри підвищується концентрація вуглецю в сталі, отже твердість і міцність.

2. Літери в кінці марки означають спосіб розкислення сталі: спокійна (сп), напівспокійна (пс) та кипляча (кп). Вміст сірки $\leq 0,05\%$ S, фосфору $\leq 0,04\%$. В марці Ст5Гпс підвищений вміст марганцю (0,8...1,2%) позначено буквою Г.

Вуглецеві конструкційні якісні сталі

поділяються на категорії (табл. 11.2):

- машинобудівні – 05, 08, 10, 20, 25, ..., 55, 60, 65, 70, 75, 80;
- автоматні – А12, А20, А30, ...;
- котельні – 20К.

Машинобудівні сталі

В залежності від кількості вуглецю машинобудівну сталь (ДСТУ 7809:2015) поділяють на:

Низьковуглецеву – для виготовлення холодно штампованих деталей, болтів, гвинтів, гайок, пальців, валиків, крюків, метизів, корпусів приладів, прокладок, труб тощо: сталі марок 05, 08.

Маловуглецеву – для виготовлення деталей, що працюють на зношування без великих навантажень: втулки, осі кулачкових валиків, кільця ланцюгів тощо тощо: сталі марок 10, 15, 20, 25

Середньовуглецеву – для виготовлення деталей, до яких ставляться вимоги високої міцності і в'язкості (осі, вали, гвинти, втулки, колінчасті вали, шайби), тому їх використовують після нормалізації, покращення, поверхневого гартування: сталі марок 30, 35, 45, 50.

Високовуглецеву – для деталей, що працюють в умовах тертя, вібрації (прокатні валки, кранові колеса, диски зчеплення, клапани компресорів) і мають збільшену міцність, зносостійкість і пружні властивості, однак вони не стійкі до динамічних і ударних навантажень. Їх використовують після гартування з відпусченням або нормалізації: сталі марок 55, 60, 65, 70, 75, 80.

**Таблиця 11.2 - Сталі вуглецеві конструкційні якісні
(ГОСТ1050-88 / ДСТУ 7809:2015)**

Група сталі	Маркування	Призначення
Низьковуглецеві 0,05-0,08 %С	05, 08	Мають малу міцність та високу пластичність, використовуються без термічної обробки для холодного штампування і холодного вичавлювання: кузови автомобілів, корпуси приладів, прокладки, труби тощо
Маловуглецеві 0,10-0,30 %С	10, 15, 20, 25	Для деталей, що підлягають цементації, ціануванню та працюють на зношування без великих навантажень: втулки, осі кулачкових валиків, кільця ланцюгів тощо.
Середньовуглецеві 0,30-0,50 %С	30, 35, 40, 45, 50	Після нормалізації, поліпшення чи поверхневого гартування для деталей, що зазнають згинання, обертання, зношування, ударного навантаження: колінчасті та розподільні вали, плунжери, шестерні та вали редукторів тощо.

Вміст вуглецю 0,55-0,80 %С	55, 60, 65, 70, 75, 80	Після гартування та середньо температурного відпускання мають високі пружні властивості та використовуються для виготовлення невеликого розміру у перерізі пружин, ресор тощо.
-------------------------------	---------------------------	--

Примітка:

1. Вміст сірки $\leq 0,04$ %, фосфору $\leq 0,035$ %.
2. Маркуються лише двома цифрами, що вказують на середній вміст вуглецю в сотих частках процента.

Автоматні сталі (табл. 11.3)

Автоматні сталі з підвищеним вмістом сірки і фосфору використовують для виготовлення на верстатах-автоматах малонавантажених деталей (болти, гвинти, гайки, дрібні деталі швейних, текстильних та інших машин). Зносостійкість таких деталей може бути підвищена цементацією та гартуванням. Сталі А30 та А40Г призначені для деталей, що зазнають значних навантажень.

В автоматних сталях, що містять свинець, підвищується стійкість різального інструменту до 3-х разів і швидкість різання на 25-50%.

Для усунення ліквідації сірки автоматні сталі піддають дифузійному відпалу за температури 1100...1150 °С.

Таблиця 11.3 - Автоматні сталі (ГОСТ 1414-75)

Група сталі	Маркування	Призначення
Вуглецева сталь, що містить сірку	A11, A12, A20, A30, A35	Деталі складної конфігурації з вимогами високої точності розмірів та низької шорсткості поверхні: шестерні, валики, заслінки, клапани, кільця, пальці, ходові гвинти металорізальних верстатів, деталі кріплення тощо.
Вуглецева сталь, що містить свинець	AC14, AC40	Те саме
Вуглецева сталь, що містить сірку та селен	A35E, A45E	Те саме

Примітка:

1. Зниження зношування інструментів, отримання ламкої стружки та низької шорсткості поверхні досягається за рахунок підвищення вмісту сірки (до 0,3 %), фосфору (до 0,15%) та введення свинцю (до 0,3 %) та селену (до 0,1 %).

2. Літера «А» в маркуванні означає автоматна, цифри - середній вміст вуглецю в сотих частках процента, С та Е - додаток свинцю та селену, відповідно.

Котельна сталь 20К (ГОСТ 5520-79)

Призначена для наступних деталей: фланці, днища, цільноковані та зварні барабани парових котлів, напівмуфти, корпуси апаратів та інші деталі котлобудування, що працюють під тиском і при температурі до 450 °С.

Вуглецеві інструментальні сталі

Характеризуються (табл. 11.4) високою твердістю, міцністю, зносостійкістю, але мають невисокий опір деформаціям. Випускаються якісними і високоякісними.

Зі сталей марок У7, У7А, У8, У8А виготовляють молотки, долота, зубила, стамески, пилки тощо.

Сталі марок У10, У11, У10А використовують для фрез, свердел, мітчиків, різців по м'якому металу та деревині, для вимірювального інструменту.

Сталі У12, У13, У13А використовують для інструменту, що працює без ударних навантажень (напилки, рашпілі, бритви пили тощо).

Таблиця 11.4 - Сталі вуглецеві інструментальні (ДСТУ 3833-98 / ГОСТ1435-99)

Група	Маркування	Призначення
1	У7, У7А, У8, У8А	Інструменти для слюсарно-монтажних робіт та обробки дерева: сокири, фрези, молотки тощо

2	У9, У9А, У10, У10А	Для обробки металу: штампи для холодного штампування, фрези, зенкери, відкрутки, калібри
3	У12, У12А, У13, У13А	Інструменти, що не піддаються ударним навантаженням, напилки, шабери, інструмент для гравірування

Примітка:

1. Літера «У» в маркуванні позначає інструментальну вуглецеву сталь, цифри вказують на середній вміст вуглецю в десятих частках процента.

2. Літера «А» в кінці марки означає, що сталь – високоякісна і має знижений вміст сірки та фосфору ($\leq 0,018 \% S, \leq 0,025 \% P$).

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке сталь, яким чином вуглець впливає на структуру та властивості сталей в рівноважному стані?
2. Яким чином класифікують вуглецеві сталі в залежності від структури в стані рівноваги?
3. Класифікація вуглецевих сталей за призначенням. Маркування вуглецевих конструкційних та інструментальних сталей.
4. Із яких сталей можна виготовити: ферму мостового крану, валик, полотно ножівки, пуансон, стамеску, шестерню, пружину тощо? Назвати марку сталі.

5. Що є основним критерієм для розподілу сталей за якістю?	<p>A. розкислення сталі. B. Ступінь легування сталі. C. Вміст у сталі сірки і фосфору. D. Вміст у сталі неметалевих включень.</p>
6. Який граничний вміст сірки і фосфору у високоякісних сталях?	<p>A. S – 0,025 %, P – 0,025 %. B. S – 0,05 %, P – 0,04 %. C. S – 0,015 %, P – 0,025 %. D. S – 0,035 %, P – 0,035 %.</p>

<p>7. Який граничний вміст сірки і фосфору у якісних сталях?</p>	<p>A. S – 0,025 %, P – 0,025 %. B. S – 0,035 %, P – 0,035 %. C. S – 0,05 %, P – 0,04 %. D. S – 0,015 %, P – 0,025 %.</p>
<p>8. До якої категорії за якістю належить сталь Ст6сп?</p>	<p>A. До високоякісних. B. До особливо високоякісних. C. До якісних. D. До сталей звичайної якості.</p>
<p>9. До якої категорії за якістю належить сталь 08кп?</p>	<p>A. До сталей звичайної якості. B. До якісних. C. До високоякісних. D. До особливо високоякісних.</p>
<p>10. Чи містять інформацію про вміст вуглецю марочні позначення сталей звичайної якості, наприклад Ст4?</p>	<p>A. Ні. B. Так. У сплаві Ст4 міститься 0,4 % вуглецю. C. Так. У сплаві Ст4 міститься 0,04 % вуглецю. D. Ні. Число 4 характеризує механічні властивості сталі.</p>
<p>11. Який зі сплавів Ст3сп або сталь 30 містить більше вуглецю?</p>	<p>A. Ст3сп. B. В обох сплавах вміст вуглецю однаковий. C. Сталь 30. D. Для відповіді на поставлене питання склад сплаву Ст3сп слід уточнити за відповідним стандартом</p>
<p>12. Вироби якого типу можуть виготовлятися зі сталей марки 65, 70?</p>	<p>A. Вироби, що виготовляються глибокою витяжкою. B. Пружини, ресори. C. Невідповідальні елементи зварних конструкцій. D. Вироби, що цементуються.</p>

<p>13. Які сталі називаються автоматними?</p>	<p>A. Сталі, що призначені для виготовлення відповідальних пружин, що працюють в автоматичних пристроях.</p> <p>B. Сталі, що тривалий час працюють при цикловому знакозмінному напруженні.</p> <p>C. Сталі з покращеною обробляемістю різанням, що мають підвищений вміст сірки або додатково леговані свинцем, селеном або кальцієм.</p> <p>D. Інструментальні сталі, що призначені для виготовлення металоріжучого інструменту, який застосовують на станках автоматах.</p>
<p>14. До якої групи матеріалів відноситься сплав марки АЦ20? Який його хімічний склад?</p>	<p>A. Конструкційна сталь, що містить ~0,2 % С і легована N I Zn.</p> <p>B. Високоякісна конструкційна сталь, що містить ~ 0,2 % С і ~ 1 % Zn.</p> <p>C. Автоматна сталь, містить ~ 0,2 % С, легована Са з додаванням Pb і Те.</p> <p>D. Алюмінієвий сплав, що містить ~2% Zn.</p>
<p>15. До якої групи матеріалів відноситься сплав марки АС40? Який його хімічний склад?</p>	<p>A. Високоякісна конструкційна сталь, що містить ~ 0,4 % С і ~ 1 % кремнію.</p> <p>B. Антифрикційний чавун. Хімічний склад в марці не відображений.</p> <p>C. Конструкційна сталь, що містить ~0,4 % С і легована азотом і кремнієм.</p> <p>D. Автоматна сталь, містить ~ 0,4 % С, легована свинцем, підвищена кількість сірки.</p>
<p>16. До якої групи матеріалів відноситься сплав марки У10А? який його хімічний склад?</p>	<p>A. Високоякісна вуглецева інструментальна сталь. Містить приблизно 1 % С.</p> <p>B. Високоякісна вуглецева конструкційна сталь. Містить приблизно 0,1 % С.</p> <p>C. Високовуглецева сталь. Містить приблизно 1 % С, легована N.</p> <p>D. Титановий сплав. Містить приблизно 10% Al.</p>

ЛЕКЦІЯ 12

ЧАВУНИ

Чавуни - це залізовуглецеві сплави, що містять більше 2,14% С. Вони кристалізуються з утворенням евтектики, характеризуються добрими ливарними властивостями: великою рідкотекучістю (наявність легкоплавкої евтектики в усіх сплавах призводить до збільшення рідкотекучості.), малою лінійною усадкою. Рідкотекучість – це здатність сплаву в рідкому стані заповнювати порожнину ливарної форми, відтворювати повністю і точно найтонші контури її конфігурації. Ця властивість сплаву впливає не лише на заповнення форми, але і на отримання якісних виливків без усадкових дефектів і тріщин. Якщо сплав має низьку рідкотекучість, то при заповненні тонкостінних великогабаритних форм рух розплаву може припинитися раніше, ніж форма буде заповнена. В результаті утворюється дефект, що називається недоливом, який не можна виправити. Вуглець у чавунах може розчинятися у фериті та аустеніті, знаходитися у вільному стані (графіт), у зв'язаному вигляді (цементит) або у частково зв'язаному та переважно у вільному стані. В залежності від цього та від форми графіту, яка зумовлюється технологією виробництва, розрізняють: білі, половинчасті, сірі, високоміцні та ковкі чавуни.

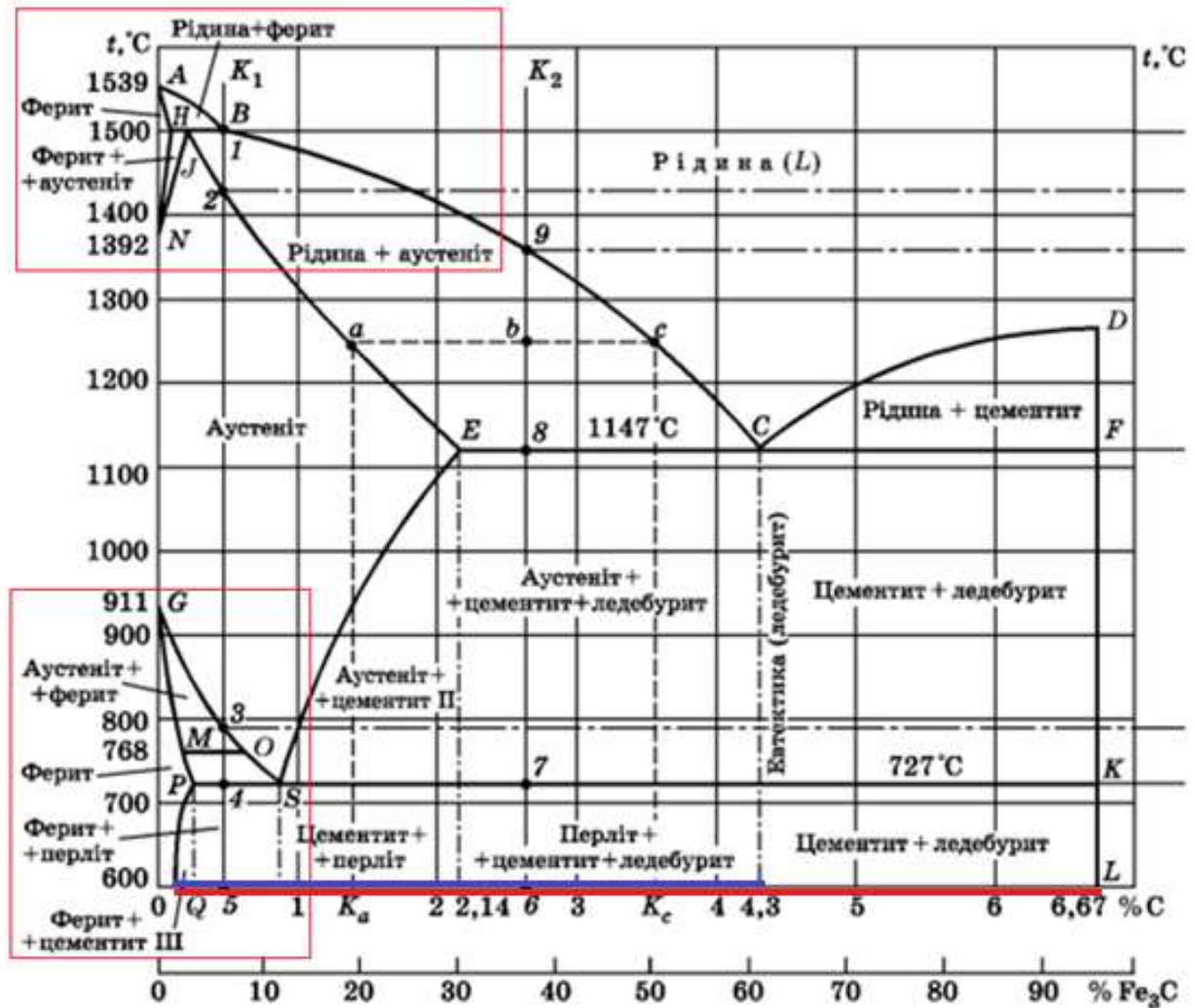
Білі чавуни

У білих чавунах весь вуглець знаходиться у зв'язаному вигляді (Fe_3C), а процеси кристалізації та структурні перетворення в них визначаються за допомогою метастабільної діаграми ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$). Вміст вуглецю визначає структурні класи білих чавунів:

- доевтектичні ($2,14\% < C < 4,3\%$);
- евтектичні ($4,3\%$);
- заевтектичні ($> 4,3\%$).

Визначимо масову частку цементиту як фази, що співіснує разом із феритом у сплавах зі змістом вуглецю 4,3% С (600 °С, конода QL):

$$W_{Fe_3C} = \frac{4,3 - 0,01}{6,67 - 0,01} = \frac{4,29}{6,66} = 0,644 = 64,4\% .$$



Велика масова частка цементиту у структурі білих чавунів (64% при вмісті 4,3%С) зумовлює їх високу крихкість, значну твердість (НВ 540...550), низьку пластичність та неможливість обробки різанням.

Велика твердість забезпечує підвищену зносостійкість в умовах абразивного зношування. Відливки з відбіленого чавуну мають у поверхневому шарі структуру білого чавуну, а в серцевині - сірого або високоміцного.

Білі чавуни обмежено використовують на практиці. Із білого та відбіленого чавунів виготовляють прокатні валки, кулі млинів для помолу руди. Білі та відбілені чавуни не маркуються.

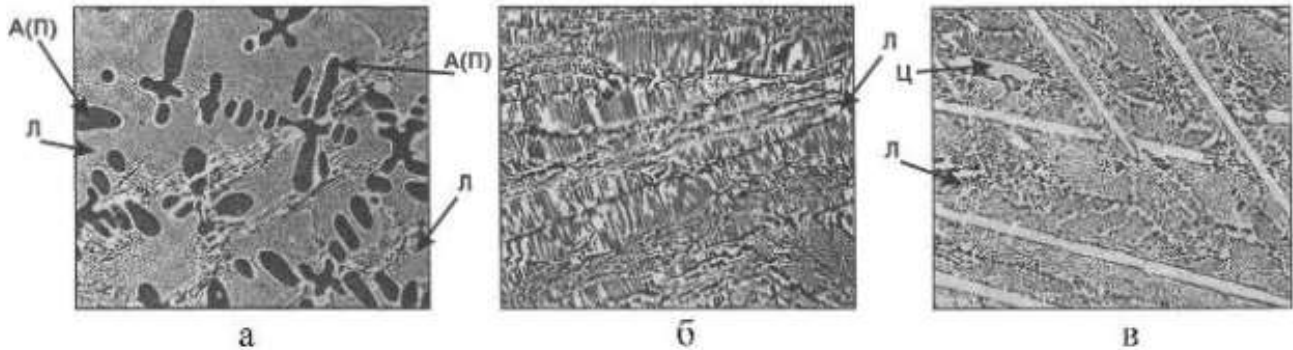


Рис. 12.1. Мікроструктури білих чавунів:
а – доевтектичний чавун; б – евтектичний чавун; в – заевтектичний чавун;
А – аустеніт, П – перліт, Л – ледебурит, Ц – цементит

Половинчасті чавуни

Половинчасті чавуни займають проміжне положення між білими та сірими. Понад 0,8%С у цих чавунах зв'язано у вигляді Fe_3C ; їх структура - перліт, ледебурит і графіт.

Сірі чавуни

У сірих чавунах (ДСТУ 2891-94) графіт має пластинчасту форму. Кристалізація та структурні перетворення в цих чавунах відбуваються відповідно до стабільної діаграми (Fe-C).

При температурі нижче $1153^{\circ}C$ утворюється аустенітно-графітна евтектика, а нижче $738^{\circ}C$ - ферито-графітний евтектоїд. Технічні чавуни, окрім заліза та вуглецю, містять кремній, марганець, алюміній тощо, тобто є багатокомпонентними сплавами, в яких евтектичне та евтектоїдне перетворення відбуваються в інтервалі температур. В залежності від структури металевої основи, сірі чавуни поділяються на:

- феритні: структура основи – ферит, практично весь вуглець, за винятком розчиненого у фериті, знаходиться у графіті;

- ферито-перлітні: структура основи – ферит і перліт. У зв'язаному стані знаходиться 0,7% С (в цементиті перліту);
- перлітні: структура основи – перліт. У цих чавунах 0,7% вуглецю знаходиться в цементиті перліту.

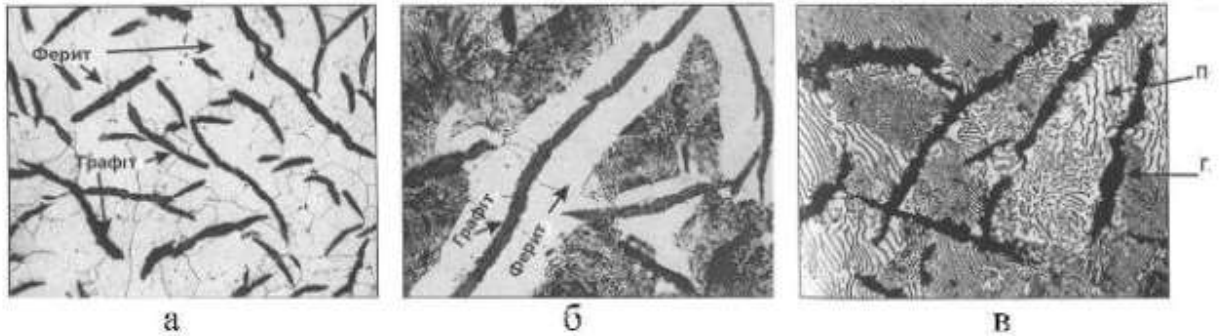


Рис. 12.2. Мікроструктури сірих чавунів: а – феритний чавун; б – феритно-перлітний чавун; в – перлітний чавун; Г – графіт пластинчастий; П – перліт

Механічні властивості сірих чавунів залежать від форми, розміру графітних частинок та структури основи. Пластинчастий графіт уявляє собою надрізи (мікротріщини), що знижують границю міцності при розтягуванні, при цьому чим дисперсніші графітні частинки, тим вище властивості чавуну. Введення в чавун модифікаторів першого роду приводить до збільшення кількості центрів графітизації та подрібнення частинок графіту.

Присутність у чавунах великої кількості мікронадрізів робить їх малочутливими до концентраторів напружень, шорсткості поверхні деталей. Графіт сприяє утворенню крихкої стружки і тим поліпшує обробку чавунів різанням. Чавуни мають високу демпфувальну здатність (добре гасять коливання). Крім цього, графіт – гарне мастило, у зв'язку з чим він підвищує антифрикційні властивості чавуну.

Структура металевої основи суттєво впливає на границю міцності при стисненні. При зростанні кількості перліту твердість і зносостійкість збільшуються. Ферит, навпаки, зменшує міцність та зносостійкість чавунів.

Сірі чавуни використовуються як матеріал для виготовлення мало- та середньо навантажених опор, деталей сільськогосподарських машин, верстатів, автомобілів, тракторів, станин електродвигунів тощо.

Властивості чавунів, у тому числі й сірих, можуть бути значно покращені модифікуванням.

Модифікування - це введення спеціальних добавок при плавленні або при розливанні сплавів з метою поліпшення їх структури та властивостей. За впливом на процеси кристалізації розрізняють модифікатори I та II роду.

Модифікатори I роду у вигляді важкотопких (тугоплавких) дисперсних частинок оксидів, нітридів, карбідів тощо - це додаткові центри кристалізації (графітизації). Вони зумовлюють утворення дрібних зерен перліту та частинок графіту малого розміру. В якості модифікаторів I роду використовують силікокальцій, титан, цирконій, феросиліцій або силікоалюміній (0,5...0,8 %).

Модифікатори II роду – це поверхнево-активні речовини. Їх атомний розмір набагато перевищує розмір атомів заліза, тому вони знаходяться не в твердому розчині, а на міжфазній поверхні. Внаслідок цього поверхнево-активні елементи зменшують поверхневу енергію межі поділу «рідина-тверда фаза», що зменшує критичний розмір зародка та змінює форму. Так, наприклад, введення в ливарну форму поверхнево-активних елементів магнію, церію сприяє глобуляризації частинок графіту у чавуні.

При маркуванні сірого чавуну (ГОСТ 1412-85) на початку ставляться літери СЧ і цифри після літер, які вказують межу міцності матеріалу при випробуваннях на розтяг. Наприклад, СЧ10 - сірий чавун з межею міцності на розтяг 10 кгс/мм² (100 МПа). Приклади маркування сірих чавунів: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45.

Високоміцний чавун

Графіт у цих чавунах має кулясту форму внаслідок модифікування магнієм чи церієм (0,03...0,07%). Така форма графіту сприяє одночасному підвищенню характеристик міцності та пластичності. Відносне видовження

високоміцних чавунів у залежності від марки може змінюватися від 2 до 12%. Структура металевої основи високоміцних чавунів може бути феритною, перлітно-феритною або перлітною. Найвища пластичність (12%) характерна для феритних, а найбільша твердість і міцність (500 МПа) - для перлітних високоміцних чавунів. Додаткові властивості: хімічна чи корозійна стійкість, зносостійкість, жаростійкість.

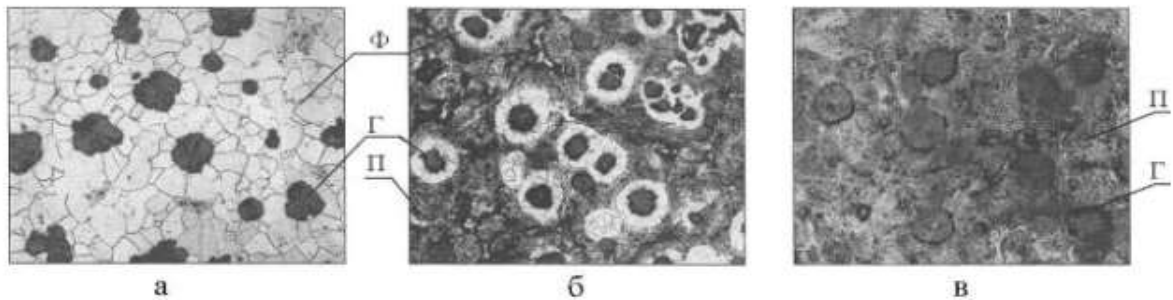


Рис. 12.3. Мікроструктури високоміцних чавунів: а – феритний чавун; б – феритно-перлітний чавун; в – перлітний чавун; Г – графіт кулястий; П – перліт; Ф – ферит

Високоміцні чавуни застосовуються як матеріали для відповідальних деталей, що працюють в умовах дії ударних і знакозмінних напружень та зношування: ковальсько-пресове обладнання, турбіни, колінчасті вали, деталі прокатних станів, траверси пресів, корпуси компресорів, крупногабаритні штампи, шестерні, ступиці коліс тощо.

Високоміцні чавуни (ГОСТ 7293-85) маркуються літерами ВЧ і двома числами. Перше число - це нижня границя міцності при випробуваннях на розтяг, друге число - відносне видовження (%). Наприклад, ВЧ45-5 - високоміцний чавун з межею міцності при розтягу 45 кгс/мм² (450 МПа) і відносним видовженням 5 %. Приклади маркування високоміцних чавунів: ВЧ38-17, ВЧ42-12, ВЧ45-5, ВЧ50-2, ВЧ60-2, ВЧ70-3, ВЧ80-3, ВЧ100-4.

Ковкі чавуни

У ковких чавунах (ГОСТ 1215-79) графіт має пелюсткову / пластівчасту форму, що є наслідком графітизаційного відпалення доєвтектичних білих чавунів (2,4...2,9 % С, 1,0...1,6 % Si, 0,3...1,0 % Mn). Графіт такої форми, в

порівнянні з пластинчастим, менше знижує міцність металевої основи, тому в ковких чавунах відносне видовження досягає значень 2...12 %.

Структура білих чавунів, призначених для відпалення на ковкі: ледебурит, перліт і цементит вторинний. Їх хімічний склад відрізняється від сірих чавунів меншим вмістом вуглецю та кремнію.

Графітизаційне відпалення проводять у дві стадії: відливки, заповнені в ящики або завантажені в піч із захисною атмосферою, нагрівають до температури першої стадії 950...1000 °С. На початку ізотермічної витримки структура відливок А+Л+Ц_п. Через те, що термодинамічно стабільною є фазова суміш А+Г, а не А+Ц, у процесі витримки внаслідок розчинення Fe₃C флукутаційно з'являються та ростуть зародки графіту. Після завершення першої стадії структура чавуну А+Г.

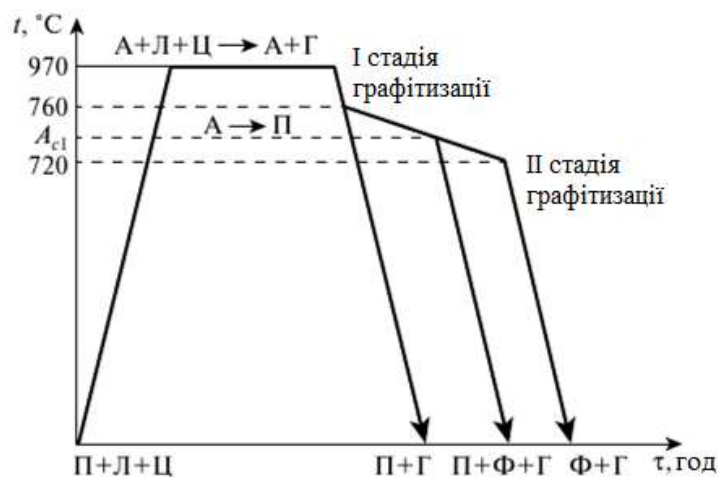


Рис. 12.4 - Режим відпалення білого чавуну на ковкий

При охолодженні від 1000 °С надлишок вуглецю виділяється з аустеніту (згідно лінії діаграми ES), який нашаровується на графітних частинках чи утворює цементит вторинний. Перетворення останнього (Fe₃C → А+Г) призводить до росту графітних частинок (проміжна стадія).

Чавуни - багатоструктурні сплави, евтектоїдне перетворення в яких проходить в інтервалі 760...720°C. Тому при повільному охолодженні в цьому інтервалі температур або довготривалій ізотермічній витримці при 720 °С

проходить друга стадія графітизації. При цьому можливе перетворення аустеніту в перліт із наступним перетворенням його цементиту на ферит і графіт або безпосереднє перетворення аустеніту на ферито-графітну суміш. В залежності від повноти графітизації на другій стадії внаслідок відпалення одержують перлітно-феритні або феритні чавуни. Якщо у відливках не відбувається друга стадія - отримують перлітні ковкі чавуни (рис.12.5).

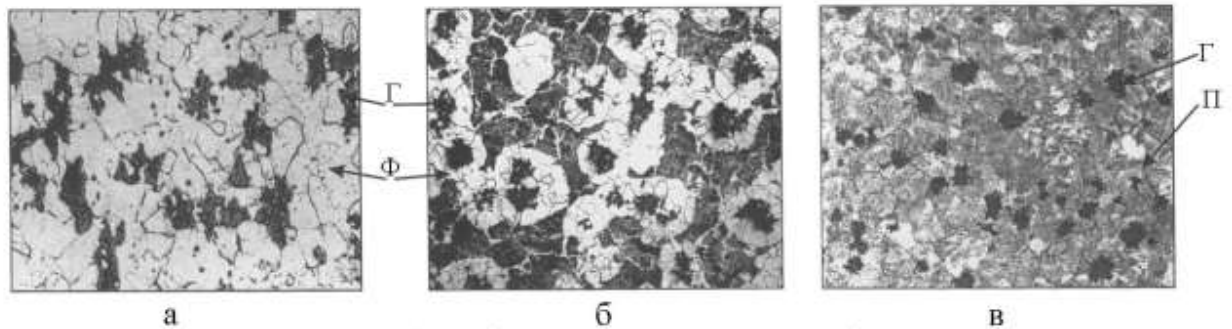


Рис. 12.5 - Мікроструктури ковких чавунів: а – феритний чавун; б – феритно-перлітний чавун; в – перлітний чавун; Г – графіт відпалення; П – перліт; Ф – ферит

З ковких чавунів виготовляють деталі машин, на які діють вібраційні, знакозмінні та ударні навантаження: картери задніх мостів автомобілів, картери редукторів, гаки, штампи холодного деформування тощо.

Маркуються ковкі чавуни літерами КЧ і двома числами, з яких перше - нижнє значення границі міцності при розтягу (кгс/мм^2), а друге - відносне видовження (%). Наприклад, КЧ35-10 - ковкий чавун з межею міцності на розтяг 35 кгс/мм^2 (350 МПа) і відносним видовженням 10% . Приклади маркування ковких чавунів:

КЧ35-10, КЧ30-6, КЧ33-8,
КЧ35-10, КЧ37-12 -
феритні; КЧ45-6, КЧ50-4,
КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2.



КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Завдяки яким властивостям чавун знаходить широке застосування як конструкційний матеріал ?
2. Як класифікують чавуни в залежності від форми графіту та структури металевої основи ? Їх вплив на властивості чавуну.
3. Властивості білих чавунів, їх призначення. Згідно з якою діаграмою стану кристалізуються білі чавуни?
4. Фактори, що впливають на структуру металевої основи чавуну?
5. Згідно з якою діаграмою стану кристалізується сірий чавун ?
6. Як одержати високоміцний та ковкий чавун ?
7. Що таке модифікування чавунів ? Назвіть модифікатори I та II роду.
8. Які фазові перетворення відбуваються на першій та другій стадіях графітизаційного відпалення ?
9. Як маркуються та для яких деталей застосовуються сірі, високоміцні та ковкі чавуни?
10. Чи залежить міцність сірого чавуну від форми графітних включень
11. У якому виді знаходиться основна частина вуглецю у білому чавуні?
12. Яку структуру має білий доєвтектичний чавун?
13. Яка форма графітних включень зустрічається в чавунах?
14. У чавуні міститься 3,5% С. Чи можна визначити, яким він буде: білим або сірим?
15. Який чавун - білий або сірий - має більшу твердість?
16. У якому вигляді знаходиться основна частина вуглецю у білому чавуні?
17. Чи змінюватиметься твердість білого чавуну при збільшенні в ньому вмісту вуглецю?
18. Виберіть марку чавуну для виготовлення відповідальних деталей машин (поршневі кільця і тому подібне).
19. Як розшифрувати марку сплаву КЧ 37-12, ВЧ50-2?

ЛЕКЦІЯ 13

ЛЕГОВАНІ СТАЛІ

Вплив легувальних елементів на структуру та властивості сталей

Більшість матеріалів для обладнання біомедичної та фармацевтичної промисловості повинна мати властивості, яким не відповідають вуглецеві сталі, тому широке використання набули леговані сталі та спеціальні сплави.

Легувальні елементи додають в сталі (рис.13.1) для підвищення конструкційної міцності. Поліпшення механічних властивостей зумовлено впливом легувальних елементів на:

- властивості фериту;
- тип, хімічний склад та дисперсність карбідної фази;
- стійкість мартенситу під час відпускання;
- прогартовуваність та розмір зерна.

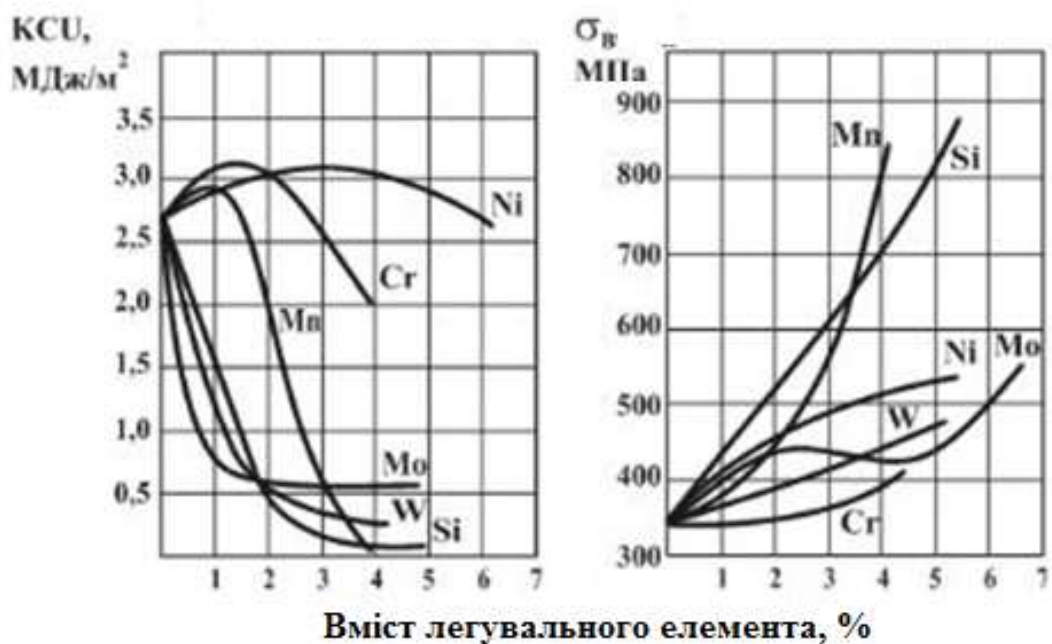


Рис. 13.1. Вплив легувальних елементів на властивості фериту - ударну в'язкість KCU та міцність σ_B

За допомогою легування можна покращити співвідношення між міцністю та в'язкістю, а також значно знизити температуру переходу сталей

до крихкого руйнування. Легування підвищує твердість сталі та теплостійкість, тобто здатність сталі протистояти знеміцненню при нагріванні до підвищених температур.

За допомогою легування підвищується опір зношуванню та корозії, тобто набуваються нові фізичні та хімічні властивості, а саме: зносостійкість, корозійна стійкість, жароміцність, жаростійкість, особливі електричні та магнітні властивості.

Легувальні елементи, за винятком вуглецю, кисню, азоту, водню та бору, утворюють тверді розчини заміщення. Значне спотворення гратки $\alpha + Fe$, що супроводжує цей процес, призводить до підвищення міцності та твердості фериту та зменшення ударної в'язкості.

Найважливішим фактором, що сприяє підвищенню конструкційної міцності завдяки легуванню, є зниження критичної швидкості охолодження при гартуванні та зростання прогартовуваності, що, в свою чергу, дає можливість отримати однорідні властивості по перерізах.

Завдяки легуванню змінюється положення концентраційних точок S та E на діаграмі залізо-цементит. Максимальна кількість вуглецю, що розчиняється в аустеніті (точка E) зменшується, що призводить до зсуву лінії SE ліворуч, тому ледебурит у структурі легуваних сталей з'являється при концентраціях вуглецю менших, ніж 2,14%.

Легувальні елементи за їх впливом на температури поліморфних перетворень поділяють на **аустенітостабілізатори** (нікель, марганець, мідь, азот) та **феритостабілізатори** (більшість легувальних елементів: хром, молібден, вольфрам, ванадій, титан, алюміній, кремній та інші). Елементи першої групи знижують температури точок A_3 та розширюють γ -зону. При уведенні феритостабілізаторів навпаки, температури точок A_3 підвищуються, а область стійкого існування аустеніту зменшується.

Класифікація і маркування легованих сталей

Залежно від вмісту легуючих елементів леговані сталі поділяють на три групи:

- низьколеговані – вміст легуючих елементів менше 2,5 %;
- середньолеговані – від 2,5 до 10 %;
- високолеговані – більше 10 %.

За призначенням леговані сталі поділяють на:

- конструкційні,
- інструментальні,
- сталі з особливими фізико-хімічними властивостями.

Для маркування легованих сталей прийнята система позначень, яка складається з букв і цифр. Кожний легуючий елемент позначається буквами (табл.13.1).

Таблиця 13.1 – Позначення легуючих елементів

В - вольфрам	Д - мідь	А - азот
Ф - ванадій	Н - нікель	Ю - алюміній
К - кобальт	Т - титан	Б - ніобій
С - кремній	Х - хром	Е - селен
М - молібден	Р - бор	Ц - цирконій
Г - марганець	П - фосфор	

Для конструкційних легованих сталей прийнято маркування, за яким перші цифри вказують середній вміст вуглецю в сотих частках процента, букви – наявність відповідних легуючих елементів, а цифри, що стоять за буквами, – процентний вміст цих компонентів у сталі. Якщо після якоїсь букви немає цифри, то це означає, що сталь містить даний елемент у кількості до 1,5 %. Приклади розшифрування марок сталей: Сталь 40Х містить 0,4 % вуглецю і до 1,5 % хрому; Сталь 16Г2 містить 0,16 % вуглецю і близько 2 % марганцю.

Для позначення високоякісної легованої сталі в кінці маркування додають букву А, наприклад, 40ХНМА; для позначення особливо високоякісної сталі – букву Ш (через дефіс), наприклад, 40ХНМ-Ш. Високоякісні сталі містять що сірки, що фосфору не більше 0,025%, а особливо високоякісні – не більше 0,015%.

Для інструментальних легованих сталей порядок маркування за легуючими елементами такий самий, як і для конструкційних, але кількість вуглецю позначається першою цифрою в десятих, а не в сотих частках процента. Якщо цифри немає, то сталь містить близько або більше 1 % вуглецю. Наприклад, марка 9ХС означає, що сталь інструментальна, містить близько 0,9 % вуглецю, та менше 1,5 % кожного з елементів - хрому та кремнію.

Сталі з особливими фізико-хімічними властивостями маркують за правилами, які можуть відрізнитися від вказаних вище правил і мають свої означення, характерні для певної групи. Ці сталі можна визначити по буквам, що ставляться попереду: А – автоматна, Ш – шарикопідшипникова, Р – швидкорізальна, М – магнітна, Е – електротехнічна тощо. Наприклад, сталь ШХ15 означає, що сталь шарикопідшипникова; подальші Х15 зовсім не вказують на кількість хрому в цій сталі. Цю сталь розшифровують за правилами, характерними для групи шарикопідшипникових сталей.

Леговані конструкційні сталі

Леговані конструкційні сталі за призначенням поділяють на групи:

- будівельні сталі,
- штаповані машинобудівельні сталі,
- машинобудівельні цементовані сталі,
- ресорно-пружинні сталі,
- зносостійкі сталі,
- корозійностійкі та інші.

До *будівельних низьколегованих сталей* належать сталі, які вміщують менше ніж 0,22 % С, а кількість легуючих домішок не перевищує 2,5 %. Для цієї групи сталей значення 0,22 % С показує на те, що вони мають невеликий вміст вуглецю і тому добре зварюються без утворення тріщин і, навпаки, коли вміст вуглецю перевищує вказану межу з'являється ймовірність утворення тріщин. До низьколегованих відносяться сталі 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 14Г2, 17ГС, 15ГФ, 15Г2СФ, 10Г2Б, 15ХСНД, 10ХНДП та ін. З них виготовляють листи, сортовий прокат і застосовують у будівництві та машинобудуванні для зварних конструкцій, в більшості випадків, без допоміжної термічної обробки. Застосування низьколегованих сталей, які мають умовну границю текучості $\sigma_{0,2} = 350$ МПа замість вуглецевих, дозволяє зекономити до 15 % металу, а при $\sigma_{0,2} = 400$ МПа – до 25 – 30 %. Деякі низьколеговані сталі мають $\sigma_{0,2} > 750$ МПа.

Низьколеговані конструкційні сталі поділяють на класи, виходячи з відношення $\sigma_B / \sigma_{0,2}$.

- до класу С 380/230 відносять сталі з нормальною міцністю;
- до класів С 460/330 і С 520/400 – сталі з підвищеною міцністю і
- до класів С 600/450, С 700/600 і С 850/750 – сталі з високою міцністю.

Приклади застосування низьколегованих будівельних сталей: допоміжні конструкції будівель виготовляються із сталей класів С 380/230, С 440/290, С 520/400; труби газопроводів великого діаметра виготовляють із сталі 17ГС; важконавантажені елементи екскаваторів виготовляють із сталей класів С 700/600...С 850/750 (12Г2СМФ, 14ГСМФР); металеві конструкції мостів виготовляють із сталей 15ХСНД, 10ХСНД, 10Г2С1Д, 16Г2АФ.

Штамповані машинобудівельні сталі (ГОСТ 9045 – 80) мають низьку границю текучості, високе відносне видовження, низьку твердість. В них обмежений вміст вуглецю (0,12%) і кремнію. Їх частіше легують V (0,02 – 0,04%), Al (0,02 – 0,07%), Cr, Mn. З цих сталей листовим штампуванням, витяжкою, волочінням виготовляють деталі автомобільної промисловості,

обшивки вентиляторів, короби тощо: сталі марок 08Ф, 09Г2С, 10Г2Ф, 08Ю, 12ХМ.

Цементовані леговані сталі – це низьковуглецеві (0,1...0,3 % вуглецю), низько і середньолеговані сталі. Ці сталі призначені для виготовлення деталей машин і приладів, що працюють на зношування і піддаються ударним та змінним динамічним навантаженням. Приклади цих сталей: 15Х, 25ХГМ, 20ХН, 20Х2Н4А. Працездатність деталей з них залежить від властивостей серцевини і поверхневого шару. Деталі, виготовлені з цементованої сталі, поверхні насичують вуглецем (цементують) і після цього піддають термічній обробці (гартування і низький відпуск). Така обробка забезпечує твердість HRC58...65 на поверхні і достатньо в'язку серцевину деталі. До поліпшених легованих сталей відносяться середньо-вуглецеві (0,3...0,7%С) і низьколеговані. Вони призначені для виготовлення відповідальних деталей (вали, зубчасті колеса, шатуни та ін.), що працюють в умовах змінних ударних навантажень. Для поліпшення властивостей (міцності, пластичності, в'язкості) ці сталі піддають термічній обробці, яка має назву поліпшення (гартування і високе відпускання). Прикладом таких сталей можуть бути сталі: 30ХГСА, 40Х, 40ХС, 45ХН2МА. Поліпшені і цементовані сталі після термічної обробки можуть досягати $\sigma_B \cong 1300$ МПа і $KC \cong 100$ Дж/см².

Ресорно-пружинні сталі (ГОСТ 14959-79, ГОСТ 14959-2016). З них виготовляють пружини, ресори та пружні елементи різного призначення. Сталі надходять у вигляді дроту або стрічки. Вміст вуглецю в сталях повинен бути не менше ніж 0,5 % для утворення необхідних пружних властивостей після виконання термічної обробки. Пружини та інші пружні деталі мусять мати великі значення $\sigma_{0,2}$, σ_1 при наявності незначної пластичності і в'язкості. Звичайна твердість досягає HRC 42...48. Для виготовлення пружних деталей можна використовувати вуглецеві сталі 65, 70, 75, 85, але частіше застосовують леговані сталі 55С2, 60С2А, 70С3А, 60С2ХФА, 65С2ВА, 50ХФА та ін.

Зносостійкі сталі (ГОСТ 5635 – 72). Ці сталі або безвуглецеві або високовуглецеві (1,1 - 1,3%С). Висока стійкість цих сталей до абразивного тертя та ударних навантажень визначається значною кількістю марганцю ($\geq 10\%$). Зносостійкі сталі використовують для виготовлення лопастей гідротурбін, відцентрових гідронасосів, хрестовин рейок, дробилок, ковшів екскаваторів, робочих органів гірничих машин, траків: сталі марок 0X14Г12, 03X1Г10, 110Г13, Г13.

Корозійностійкі (нержавіючі) сталі. Ці сталі повинні мати вміст хрому більш ніж 10,5% (ДСТУ EN 10020-2002). Стійкість до корозії обумовлюється тим, що в поверхневому шарі в умовах окислювання утворюється тонкий захисний шар оксиду хрому, який захищає сталь від корозії. Корозійностійкі сталі поділяють на хромисті (10X13, 20X13, 40X13) і хромонікелеві (04X18Н10, 12X18Н10Т, 12X21Н5Т). хромонікелеві сталі більш корозійностійкі, ніж хромисті.

Таблиця 13.2 - Властивості і призначення деяких легованих конструкційних сталей

Марка сталі	ТО або ХТО*	Механічні властивості			Призначення
		σ_0 , МПа	σ_B , МПа	δ , %	
15Г	Без ТО	250	420	26	Без ТО: трубки, втулки, штуцера, зварені труби тощо. Після поліпшення: заклепки для відповідальних з'єднань. Деталі що цементують: фрикційні диски, поршневі пальці, втулки тощо.
70Г	Без ТО. Г і ВС	430 1320	730 1600	9 4	Пружини, ресори, шайби, цанги, упорні і стопорні кільця та інші деталі, що мають високі пружні властивості і зносостійкість; бандажі, гальмові барабани, втулки, деталі вентиляторів тощо

09Г2	-	310	450	21	Деталі зварних конструкцій вагонів, доменних печей, апаратів хімічного і нафтового машинобудування тощо
14Г2	-	340	470	21	Великі листові зварні конструкції доменних печей, нагрівачів повітря тощо
09Г2С	-	350	500	21	Деталі, що працюють при температурах - 70 до 475 °С: деталі екскаваторів, зварні конструкції у вагонобудуванні, котлобудуванні тощо
14ХГС	-	350	500	22	Зварні труби для газопроводів високого тиску
15ХСНД	-	350	500	21	Зварні будівельні ферми, конструкції мостів і вагонів, рами сільгосп машин, болти та інші деталі, що потребують підвищеної стійкості проти корозії
15ХРА	Г і ВН	550	750	15	Поршневі пальці, дрібні шестерні, осі, муфти, втулки, поршневі кільця тощо
35ХРА	Г і ВВ	800	950	12	Осі, вали, шестерні, пальці, втулки, болти тощо
38ХА	Г і ВН Г і ВВ	1200 500	1400 750	8 15	Осі, вали, шестерні, пальці, втулки, болти тощо
60С2	Г і ВС	1200	1300	5	Ресори, пружини з круглим, прямокутним, квадратним і овальним перерізом, що мають товщину меншу ніж 16 мм
50ХФА	Г і ВС	1300	1500	12	Пружини клапанів легкових автомобілів та інші пружини, що працюють при довгих циклах роботи
70С2ХА	Г і ВС	1700	1900	5	Високо навантажені пружини з тонкої пружинної стрічки (пружини часових механізмів та різних приладів)
65С2ВА	Г і ВС	1700	1900	5	Дуже відповідальні і високо навантажені пружини і ресори, що виготовляються з тонкої пружинної

					стрічки. Сталь потребує подовжених режимів відпуску
60C2H2A	Г і ВС	1600	175	5	Дуже відповідальні і високо навантажені пружини і ресори, що виготовляються з стрічки каліброваної сталі. Сталь володіє гарними технологічними і експлуаційними властивостями

* - Застосовані такі позначення: Н – нормалізація, Г – гартування, ВН – відпуск низький, ВС – відпуск середній, ВВ - відпуск високий. ТО – термічна обробка.

Леговані інструментальні сталі

Леговані інструментальні сталі, в порівнянні з вуглецевими інструментальними, мають більшу теплостійкість, в'язкість і зносостійкість.

Низьколеговані інструментальні сталі (9ХС, ХВГ, ХВСГ) мають високу твердість (HRC 60-65), зносостійкість і малу теплостійкість (200...250 °С), у них добра прогартуваність, тому з цих сталей можна виробляти більш габаритні інструменти (пресформи, вимірювальні інструменти та ін.).

Високолеговані інструментальні сталі містять вольфрам, хром, ванадій в значній кількості. Вони мають високу теплостійкість (500...650 °С), завдяки чому їх використовують для виготовлення високопродуктивного різального інструменту і називають швидкорізальними сталями.

Найбільш розповсюджені наступні швидкорізальні сталі: Р18, Р9, Р10К5Ф5 та ін. Тут Р означає "швидкорізальна", цифри після букви Р вказують на вміст вольфраму у процентах. Вміст хрому (4 %) і ванадію (2 %) при маркуванні не вказується. Коли сталі додатково містять молібден, кобальт, ванадій, то в маркуванні ці елементи позначаються відповідно буквами М, К, Ф і цифрами, які вказують на їх кількість у процентах. Швидкорізальні сталі використовуються для виготовлення швидкорізального інструменту (свердла, мітчики, плашки та ін.).

Інструментальні сталі призначені для виготовлення оброблювального чи вимірювального інструменту. Основними споживчими властивостями інструментальних легованих сталей є висока твердість, зносостійкість і міцність при високій (500...800°C) теплостійкості. При цьому вони повинні володіти прогартованістю, малими об'ємними змінами, штампованістю, оброблюваністю. Такі особливості надаються сталям карбідними фазами легуючих елементів W, Mo, V, Ti, Co, Cr, Mn.

Леговані інструментальні сталі за призначенням поділяють на групи:

Штампові сталі підвищеної в'язкості (ГОСТ 5950 – 73). Вміщують 0,6..0,75%С, леговані Mn, Cr, Si, v. Їх поділяють на сталі штампів холодного і гарячого деформування: сталі марок 5ХНМ, 5ХЗВЗМФС, 7ХГ2ВМ, 6Х6ВЗМФС;

Швидкорізальні сталі (ГОСТ 19265 – 73). Високі різальні властивості забезпечуються вмістом вуглецю ~ 0,8...1,25% і легуванням вольфрамом. З цих сталей виготовляють різці, фрези, свердла: сталі марок Р18, Р9, Р6М5, Р9М4К8, В11М7К23;

Інструментальні сталі високої твердості (ГОСТ 1435 – 74). Це високо вуглецеві (0,7..1,35%С) і низьколеговані Mn, Si, Cr, Ni та інші, сталі для тонкого, малого перерізу різального інструменту: сталі марок ХВГ, Х12, 9ХС, Х6ВФ; - інструментальні сталі для вимірювального інструменту: калібрів, шаблонів, плиток. Повинні мати високу твердість, зносостійкість, збереження постійності розмірів: сталі марок Х, ХВГ, Х12Ф1.

Сталі спеціального призначення

Сталі і сплави спеціального призначення часто називають прецизійними, тобто з особливими магнітними, електричними, тепловими, пружними властивостями, чи рідким сполученням властивостей, рівень яких в значній мірі обумовлений точністю хімічного складу, ретельністю отримання

і обробки. Як конструкційні матеріали найбільш поширені сталі із заданим коефіцієнтом лінійного розширення; із високим електроопором; магнітні.

Сталі з високим коефіцієнтом лінійного розширення (ГОСТ 109994 – 74) призначені для деталей, які впаюють у скляні та керамічні корпуси вакуумних приладів. Це сплави системи Fe+Ni+Co+Cu. Представниками цієї групи сталей є ковар (29НК, 29% Ni, 18% Co, залишок – Fe), інвар (36% Ni, $\leq 0,05\%C$, залишок – Fe). Для інших приладів, що працюють при змінних високотемпературних умовах, використовують сталі марок 18ХТФ, 18ХМТФ.

Сталі з високим електроопором (ГОСТ 109994 – 74) мають електроопір в десятки разів вищий, ніж у вуглецевої сталі, та високу жаростійкість (до 1350°C). При цьому, вони повинні мати високу пластичність, яка б забезпечувала гарну деформованість та оброблюваність. Це сплави системи Fe+Cr+Al – фехраль (Х13Ю4); Fe+Ni+Cr – хромель, ферроніхром (0Х23Ю5, 0Х27Ю5А, Х15Н60); Ni+Cr – ніхром (Х20Н80). Вуглець в цих сплавах суворо обмежений (0,006...0,12%С), бо знижує пластичність виробів. Ці сталі призначені для виготовлення елементів нагрівальних пристроїв, реостатів, резисторів, терморезисторів, тензодатчиків.

Магнітні сталі і сплави поділяють на магнітно-м'які, магнітно-тверді та парамагнітні. Магнітно-тверді (ГОСТ 17809 – 72) характеризуються високою коерцитивною силою і магнітною енергією. Це високовуглецеві сталі (1,2...1,4%С), леговані хромом кобальтом, алюмінієм і іншими. Їх використовують для виготовлення постійних магнітів. Найбільш застосованими є вуглецеві магніти (ЕХ2, ЕХ3) та сплави альніко (ЮНДК15, ЮН14ДК25А, ЮНДК31ТЗБА). Ці сплави тверді, крихкі не піддаються деформації, тому магніти з них виготовляють литтям.

Магнітно-м'які сталі (ГОСТ2127 – 75) називають електротехнічними. Магнітно-м'які сталі відрізняються легким намагнічуванням у слабких магнітних полях. Основними властивостями є висока магнітна пронизливість, низька коерцитивна сила, що забезпечується гомогенною структурою – чистий

твердий розчин з відсутністю домішок. Ці сталі є безвуглецевими (0,05...0,005%С) і з вмістом кремнію 0,8...4,8%, або леговані нікелем. Ці сталі призначені для виготовлення магнітопроводів постійного і змінного струму, якорів і полюсів електротехнічних машин, роторів, статорів, пластин трансформаторів.

Парамагнітні сталі – це аустенітні сталі системи Fe+Ni+Cr+Ti, які мають дуже низьку магнітність і високу механічну міцність, однак у них низька границя текучості, що обмежує використання в навантажених вузлах. Це сталі 55Г9Н9Х3, 40Г14Н9Ф2.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке легована сталь ? Класифікація за призначенням.
2. Мета легування конструкційних та інструментальних сталей.
3. Взаємодія легувальних елементів із залізом та вуглецем. Їх вплив на властивості фериту.
4. Вплив легувальних елементів на критичні точки A_1 , A_3 та концентраційні точки S та E.
5. Вплив легувальних елементів на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту.
6. Класифікація легованих сталей за структурою у відпаленому стані.
7. Класифікація легованих сталей за структурою у нормалізованому стані.
8. Маркування конструкційних та інструментальних сталей.
9. Швидкорізальні сталі. Особливості їх структури та властивості.
10. Особливості термічної обробки інструментів із швидкорізальних сталей.

ЛЕКЦІЯ 14

КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ. МІДЬ ТА ЇЇ СПЛАВИ

Мідь – метал червоно-рожевого кольору, пластичний, м'який, густина 8,96 г/см³, температура плавлення 1083°C, кристалічна ґратка ГЦК. Мідь хімічно малоактивна. Має високий електроопір, прийнятий в техніці за еталонний – 100%. Важливе значення має теплопровідність міді. Механічні властивості міді невисокі і суттєво залежать від умов виготовлення деталей. Серед технологічних властивостей можна відзначити гарну оброблюваність тиском, можливість пайки та досить низькі ливарні властивості, зварюваність та оброблюваність різанням. Чиста мідь використовується в електротехніці для виготовлення електричних, телеграфних та телефонних дротів (М00, М0, М1), теплотехнічних виробів (нагрівачів, теплообмінників, радіаторів) у вакуумній техніці, а також в якості основи мідних сплавів.

Основними перевагами мідних сплавів є висока електропровідність, низький коефіцієнт тертя, висока пластичність, значна міцність, корозійна стійкість в агресивних середовищах, можливість термомеханічної обробки.

Мідні сплави поділяються на:

- Латуні: сплав Cu + Zn;
- Бронзи: сплав Cu + Sn, Cu + Al, Si, Be;
- Мідно-нікелеві сплави.

За хімічним складом сплави міді поділяються на прості (бінарні) та спеціальні леговані (багатокомпонентні).

За технологічними властивостями і способом виготовлення мідні сплави поділяють на деформівні та ливарні. З деформівних виготовляють листи, труби, напівфабрикати різного профілю. З ливарних – корпусні, фасонні виливки та художні вироби.

У зв'язку з обмеженою розчинністю легуючих елементів у міді, зміцнення мідних сплавів термічною обробкою ускладнене, краще

застосовувати термомеханічне зміцнення чи наклеп. Пластичність мідних сплавів підвищується відпалюванням (600 – 700°C).

Латунь

Латунями (ГОСТ 15527–70, ГОСТ 17711–80) називають сплав міді з цинком та різними легуючими добавками (Al, Sn, Mn, Ni, Si, Pb та іншими, сума яких не перевищує 10%). Вміст цинку в латуні змінюється до 49%. Цинк визначає механічні властивості латуні: чим більше Zn, тим вище твердість, міцність і, як наслідок, крихкість, при цьому знижуються характеристики пластичності. Зі збільшенням вмісту Zn колір латуней змінюється від рожево-жовтуватого до світло-жовтого.

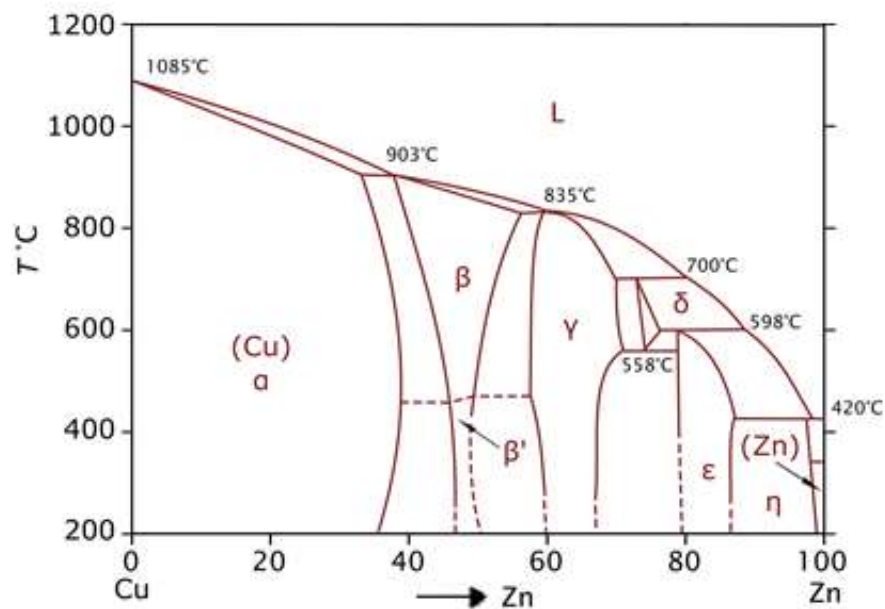


Рис.14.1. Діаграма стану системи Cu-Zn

Прості, однофазні латуні мають структуру твердого розчину цинку в міді. В них вміст цинку не перебільшує 39%. Ці латуні досить пластичні, добре паяються, зварюються, обробляються тиском у гарячому і холодному стані, мають високу корозійну стійкість. Їх використовують для виготовлення радіаторних трубок, деталей конденсаторно-холодильного обладнання, ущільнювальних прокладок, дроту, гільз, деталей електрообладнання, штампованих та пресованих деталей. Приклад: Л96, Л80, Л70, Л68, Л59.

Багатокомпонентні латуні можуть бути леговані різними компонентами чи їх комплексами. Легуючі елементи в латунях суттєво змінюють їх властивості. Так Al, Si, Ni, Mn підвищують механічні властивості латуней і збільшують їх корозійну стійкість; Sn – збільшує корозійну стійкість у морській воді; Pb – покращує оброблюваність різанням. Леговані латуні застосовують для виробів, що працюють при більших навантаженнях та у більш складних умовах експлуатації. Приклад: ЛАЖ 60-1-1, ЛЖМц 59-1-1, ЛС 59-1, ЛЦ40С, ЛЦ40МцЗЖ.

Завдяки гарному поєднанню механічних, технологічних і широкому діапазону споживчих властивостей, латуні відносяться до найбільш розповсюджених конструкційних матеріалів,

Бронза

Бронзою називають сплави міді з оловом чи деякими іншими елементами, наприклад, алюмінієм, кремнієм, берилієм, свинцем. Назву конкретний вид бронзи отримує за основним компонентом, що входить до сплаву з міддю. Наприклад: олов'яні бронзи, кременисті бронзи. До складу бронзи також можуть входити і легуючі елементи.

Структура та властивості бронзи змінюються в залежності від швидкості охолодження при кристалізації сплавів, виду термічної обробки і характеру обробки тиском. Для покращення властивостей їх піддають термічній обробці: відпалюванню, гартуванню з відпущенням або пластичному деформуванню з метою наклепу. Більшість бронз, окрім алюмінієвих, гарно піддаються зварюванню і паянню.

Олов'яні бронзи. Вміщують до 14% олова, збільшення кількості якого підвищує твердість і міцність. Однак, внаслідок високої вартості олова його частку замінюють свинцем чи цинком. Додаткове легування здійснюють Zn, Pb, Ni, P. Фосфор покращує ливарні властивості та збільшує твердість, Свинець і цинк покращують оброблюваність різанням і антифрикційні властивості. Олов'яні бронзи мають високі антифрикційні властивості,

корозійну стійкість і досить високі пружні властивості. З них виготовляють різний прокат, дріт для пружин, ливарні деталі корпусів складної форми, деталі високого навантаження, опорні шайби, шестерні, деталі паро- і гідроапаратури. Приклад: БрОФ10-1, БрОФ8,5-0,3, БрЩ4Ц4С17.

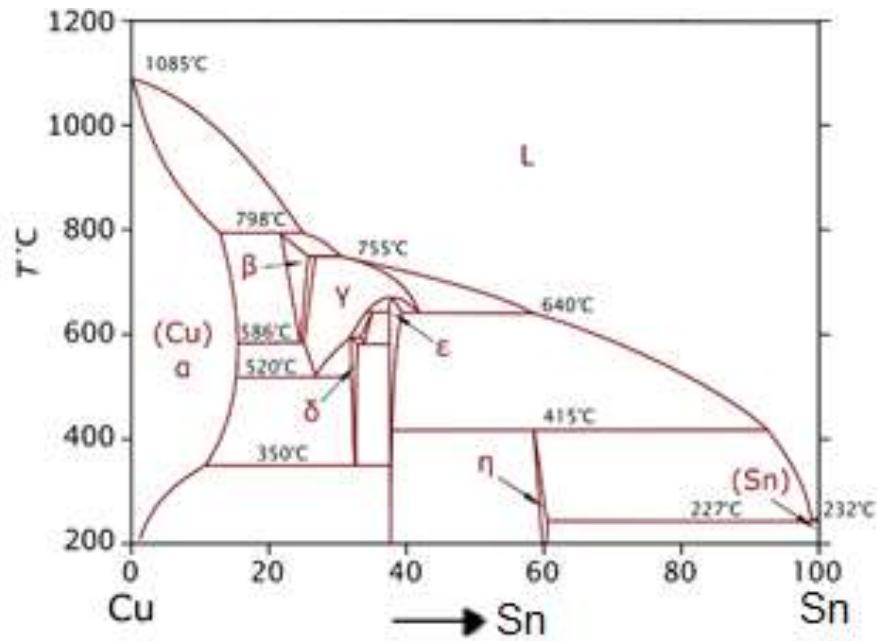


Рис. 14.2. Діаграма стану системи Cu-Sn

Алюмінієві бронзи. Вміщують 5...11%Al. Вони є найбільш розповсюдженими і дешевими замінниками олов'яних бронз і навіть перевищують їх за ливарними властивостями, мають вищу міцність, жаростійкість та хімічну стійкість. Недоліком цих бронз є важке паяння і зварювання. Бронзи, що містять до 7,5%Al однофазні, дуже пластичні, стійкі до стирання і використовуються для виготовлення напівфабрикатів різного профілю, стрічки, листів, дроту для пружних елементів і струмопровідних пружин. Двофазні бронзи зазвичай леговані Ni, Mn, Fe. Нікель підвищує механічні і фізичні властивості, жаростійкість, корозійну стійкість. Марганець підвищує технологічні властивості, морозостійкість, оброблюваність тиском. Залізо в комплексі з іншими елементами суттєво підвищує міцність і зносостійкість. З цих бронз виготовляють фасонні виливки, шестерні, втулки,

деталі турбін і двигунів, деякі застосовують для виготовлення литих підшипників і втулок. Приклад: БрА5, БрА7, БрАЖМц 10-3-1,5.

Кременисті бронзи. Вміщують до 3,0%Si. Основними легуючими елементами є Mn і Ni. Ці бронзи перевершують інші за міцністю і стійкістю в лужних середовищах, тому використовуються для виготовлення труб і арматури хімічної промисловості. В багатьох випадках вони є заміниками дорогих олов'яних чи берилієвих бронз і латуней. Кременисті бронзи легко обробляються тиском, різанням і зварюються, однак їх ливарні характеристики низькі. Приклад: БрКМЦ3-1.

Берилієві бронзи. Містять до 1,8...2,5% Be. Легуючими елементами в них є Mn, Ni, Fe, Co, Ti та інші. Ці бронзи крім високої міцності характеризуються високою пружністю і електропровідністю. Вони добре обробляються різанням і зварюються. З причини високої вартості ці бронзи використовуються для особливо відповідальних виробів контрольно-вимірювальних приладів, контактів, роз'ємів, різних пружних елементів в авіаційній апаратурі, радіотехніці, зв'язку тощо. Приклад: БрБ2, БрБНТ 1,7; БрБНТ 1,9.

Свинцеві бронзи. Містять до 27... 3% свинцю (Pb). За рахунок того, що свинець практично не розчиняється в міді, в цих бронзах по границям зерен розміщується евтектика у вигляді крапель. Саме така структура й забезпечує основну характеристику свинцевої бронзи – антифрикційність (низький коефіцієнт тертя). Однак, механічні характеристики їх невисокі. Легують ці бронзи Ni і Sn. Використовують свинцеві бронзи у вузлах тертя, підшипниках ковзання, біметалевих виробів. Приклад: БрС30, БрСН60-2,5, БрСО12-8.

Мідно-нікелеві сплави

Cu з Ni утворюють тверді розчини. Ni збільшує твердість, міцність і електроопір, зменшує коефіцієнт лінійного розширення, підвищує корозійну і теплостійкість. Мідно-нікелеві сплави виділені в особливу групу (ГОСТ 492–

73). Їх поділяють на конструкційні – мельхіор, нейзильбер, куніаль та електротехнічні – копель, константан, манганін.

З *мельхіору* (МНЖМц30-0,8-1) виготовляють конденсаторні трубки, медичний інструмент, деталі точної механіки і хімічної апаратури; *нейзильбер* (МНЦ15-20) використовують для електротехнічних плоских пружин, реле, термопар, реостатів, деталей карбюраторів; *куніаль* (МНА13-3) застосовують для деталей підвищеної міцності, пружин; *копель* (МНМц43-0,5) і *константан* (МЕМц40,1,5) ідуть на виготовлення дроту вимірювальних і нагрівальних приладів, термопар, компенсаторів; *манганін* (МНМц3-12) має малу термо-ЕРС та електроопір і використовується в резисторах, електроприладах.

Маркування мідних сплавів

Прості латуні маркуються буквою «Л», наступне число за нею означає вміст міді, залишком (до 100%) є цинк. Приклад: Л86 – латунь, міді 86%, цинку – 14%; Л59 – латунь, міді 59%, цинку – 41%.

Леговані багатоконпонентні латуні маркуються з врахуванням технологічних властивостей. В ливарних латунях після букви «Л» вказують цинк та його вміст у відсотках, далі іде перелік легуючих елементів з позначенням їх кількості, залишком (до 100%) є мідь. Приклад: ЛЦ40С – латунь, цинку 40%, свинцю – 1%, міді – 59%; ЛЦ40Мц3Ж – латунь, цинку 40%, марганцю – 3%, заліза – 1%, міді – 56%.

Деформівні латуні маркують з вказуванням після букви «Л» всього переліку легуючих елементів після чого через дефіс їх кількості, причому на першій позиції вказують кількість міді, залишком (до 100%) є цинк. Приклад: ЛС59-1 – латунь, міді 59%, свинцю – 1%; ЛАЖ60-1-1 – латунь, міді 60%, алюмінію – 1%, заліза – 1%.

Бронзи маркуються буквами «Бр», далі слідує буквене і числове позначення елементів, причому кількість міді не вказується, а визначається по різності до 100%. В марках *деформівної бронзи*, що оброблюється тиском,

після букв «Бр» стоїть буквене позначення легуючих елементів в порядку зменшення їх концентрацій, а далі в тій же послідовності через дефіс вказується їх кількість. Приклад: БрОФ10-1 – бронза олов'яна, олова – 10%, фосфору – 1%, міді – 89%; БрКМц3-1 – бронза кремениста, кремнію – 3%, марганцю – 1%, міді – 96%.

В ливарних бронзах після кожного буквеного позначення легуючого елементу вказується його вміст у %. Приклад: БрО4Ц4С17 – бронза олов'яниста, олова 4%, цинку – 4%, свинцю – 17%, міді – 75%; БрС30 – бронза свинцева, свинцю 30%, міді – 70%; БрА10Ж3Мц2 – бронза алюмінієва, алюмінію – 10%, заліза – 3%, марганцю – 2%, міді – 85%.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте характеристику міді. Чим можна пояснити її корозійну стійкість.
2. Назвіть основні переваги мідних сплавів.
3. За якими ознаками класифікують мідні сплави.
4. Чи можливе зміцнення мідних сплавів термічною обробкою.
5. Які сплави називаються латунями. Який елемент сплаву найбільш впливає на механічні властивості латуні.
6. Чим можна пояснити широку розповсюдженість латуней як конструкційних матеріалів?
7. Які сплави називаються бронзами.
8. Надайте загальну характеристику олов'яним, алюмінієвим, кременистим і берилієвим бронзам
9. Які особливості структури свинцевої бронзи забезпечують антифрикційність цих сплавів.
10. Наведіть приклади мідно-нікелевих сплавів. Надайте характеристику цим сплавам за Курнаковим.
11. Як маркуються мідні сплави ливарні та деформівні. Наведіть приклади

ЛЕКЦІЯ 15

КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ. АЛЮМІНІЙ, МАГНІЙ, ТИТАН

Алюміній – сріблясто-білий метал з граткою ГЦК, густина $2,7 \text{ г/см}^3$, температура плавлення – 660°C . Міцність і твердість алюмінію невеликі, однак пластичність достатньо висока: $\sigma_{\text{в}}=50 \text{ МПа}$, $\delta=50\%$. Алюміній характеризується високими електропровідністю, теплопровідністю та корозійною стійкістю. Серед технологічних властивостей слід відзначити гарну оброблюваність тиском, зварюваність, невисоку оброблюваність різанням. Особливо чистий алюміній (А999, А995, А99, А97) та технічно чистий (А85, А8, А7, А0-99,0%Al) використовується для елементів конструкцій, які не несуть значних навантажень, для електричного дроту, кабелів, конденсаторів, в хімічній та харчовій промисловості.

В якості конструкційного матеріалу в промисловості частіше використовуються сплави алюмінію. Перевагами їх є висока міцність, мала питома вага, корозійна стійкість, тепло-, електропровідність, гарні технологічні властивості. Найбільш поширеними є сплави алюмінію з Cu (рис. 15.1), Si (рис. 15.2), Mg, Mn, Zn.

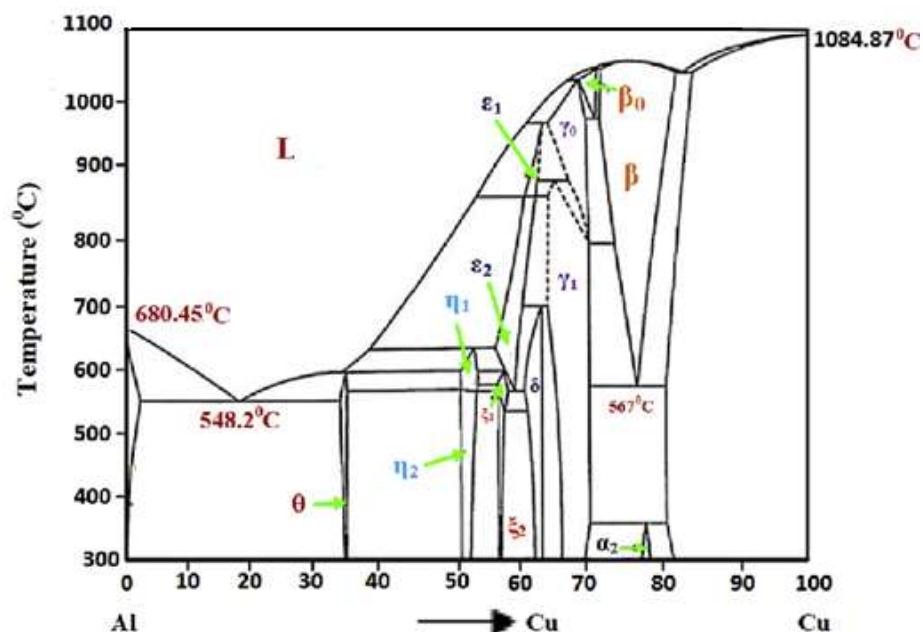


Рис. 15.1. Діаграма стану системи Al-Cu

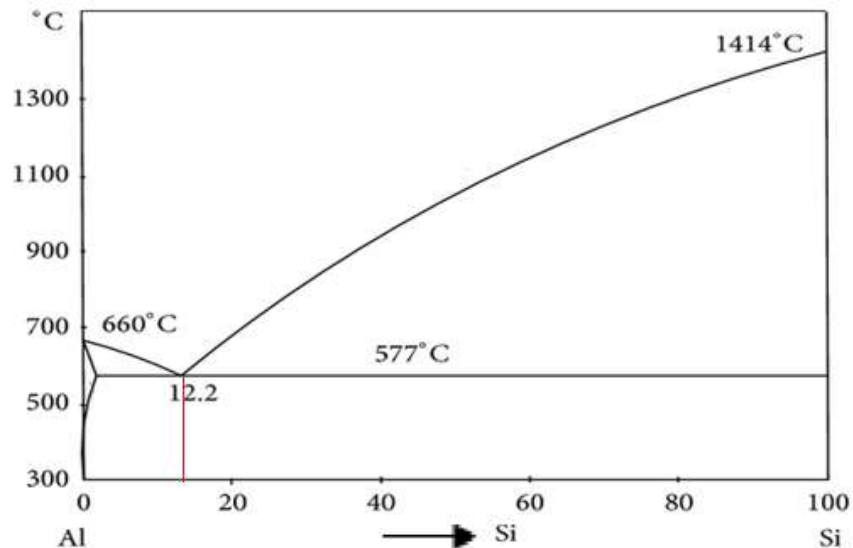


Рис. 15.2. Діаграма стану системи Al-Si

Класифікуються сплави алюмінію за складом, споживчими і технологічними властивостям (способом обробки), а також можливостями зміцнення термічною обробкою. За складом і споживчими властивостями сплави алюмінію поділяють на:

Сплави високої міцності. Вони мають складний хімічний склад, легуються Cu і Mg та мають у порівнянні з іншими більшу міцність ($\sigma_{\text{в}} \geq 600$ МПа). Приклад: В95;

Жаростійкі сплави. Леговані Ni. Температура експлуатації складає 300...350°C.

Сплави підвищеної пластичності. Мають обмежений вміст міді ($\leq 0,5\%$), додатково легується Mg та Mn. Поєднують незначну твердість і високі показники пластичності;

Антифрикційні сплави – сплави Al та Sn, додатково леговані Ni, Cu та іншими.

За технологічними ознаками алюмінієві сплави поділяють на *ливарні* та *деформівні* (оброблювані тиском). В кожній з цих груп існують підгрупи зміцнюваних і незміцнюваних термічною обробкою сплавів.

Характеристика алюмінієвих сплавів

До найбільш поширених алюмінієвих сплавів відносять силумін, дуралюмін, авіаль і антифрикційні сплави.

Силумін – ливарний сплав на основі Al з Si (4...13%, до 23%) та легуючими елементами Cu, Mn, Mg, Zn, Be. Силуміни поєднують жаростійкість, зносостійкість і розмірну стабільність при задовільних механічних характеристиках. Ці сплави використовують в серійному виробництві для деталей гідро- і пневмосистем складної конфігурації, корпусних виробів. Приклад: АЛ5, АЛ8, АК12М2МгН.

Дуралюмін – сплав на основі Al з Cu (2,2 ... 5,2%) + Mg (0,2 ... 2,7%) + Mn (0,2 ... 1,0%). Відносять сплав до оброблюваних тиском і зміцнюваних термічною обробкою. Ці сплави поєднують високу міцність з високою пластичністю при середній твердості. Деталі виготовляють прокаткою, пресуванням, куванням. Використовують для авіаційного і транспортного машинобудування. Приклад: Д1, Д6, Д31.

Авіаль – сплав на основі Al з Mg, Si, Mn/ Cr та Cu (загалом до 3%). Ці сплави найменш леговані, є деформівними, зміцнюються термічною обробкою. При середній міцності мають високу технологічність і стійкість проти корозії. З авіалю виготовляють ковани та штамповані деталі складної форми авіаційної техніки, широко використовують в будівництві (профілі, рами). Приклад: АВ1, АД1, АД31.

Кувальні сплави – це сплави системи Al + Cu + Mg, леговані Ni та Fe. Відзначаються високою пластичністю, стійкістю до утворення гарячих тріщин, тому деталі з них (підмоторні рами, стикові вузли, кріпильні деталі, крильчатки вентиляторів, лонжерони) отримують гарячою обробкою тиском. Приклад: АК6, АК8, АК4.

Сплави Al + Mg, Al + Mn це сплави, що не зміцнюються термічною обробкою. Вони мають гарну пластичність при середній міцності. Зміцнення цих сплавів здійснюється нагартовкою. Ці сплави добре обробляються тиском

(ковкою, штамповкою), гарно зварюються, мають високу корозійну стійкість, але обробка різанням ускладнена. Використовують для зварених та клепаних елементів ненавантажених конструкцій, різних резервуарів, ємкостей, трубопроводів. Приклад: АМг2, АМг6, АМц, АМц4.

Антифрикційні сплави представляють сплави Al + Sn та Al + Ni. Вони мають низький коефіцієнт тертя і високу теплопровідність. Використовуються для виливок вкладишів та втулок підшипників та вузлів тертя, для отримання біметалевої стрічки. Приклад: АО3-7, АО9-2, АО20-1, АН-2,5, АСМ, АСМТ.

Маркування алюмінієвих сплавів

При маркуванні сплавів алюмінію вказують тип і назву сплаву та порядковий номер у відповідному ГОСТі.

«АЛ» позначають ливарні сплави – силуміни.

«АВ» і «АД» позначають авіаль та деформівні алюмінієві сплави.

«Д» позначають дуралюміній.

«АК» позначають кувальні сплави.

«АМг», «АМц» позначають сплави алюмінію з Mg та Mn відповідно.

Приклади:

АЛ4 – силумін, №4;

АЛ8 – ливарний сплав №8;

Д16 – дуралюмін №16 по ГОСТ;

АМг6 – деформівний, незміцнювальний сплав №6.

Магній та його сплави

Магній (Mg) – метал сріблясто-білого кольору, кристалічна ґратка ГЦП, температура плавлення – 651°C, густина – 1739 г/м³. Чистий магній на повітрі легко загоряється, є хімічно активний, має низьку стійкість до корозії. Механічні властивості магнію: $\sigma_B=115$ МПа, $H_B=30$ МПа, $\delta=8\%$.

Магній маркується за чистотою і випускається трьох марок (ГОСТ 804 – 72): МГ90 (99, 9% Mg), МГ95 (99,95% Mg), МГ96 (99,96% Mg). **Промислові вироби з магнію не виготовляють.** Він використовується, головним чином, у виробництві легких сплавів, для розкислення, відновлення в металургійних процесах. Чистий магній застосовують у піротехніці та хімічній промисловості.

Промислове значення мають сплави магнію. Їх основна перевага - низька щільність. Сплави магнію мають порівняльно високу міцність, добре гасять вібрації, однак, маючи низький модуль пружності, використовуються тільки для **ненавантажених деталей.** Магнієві сплави мають низьку корозійну стійкість та ускладнену технологічну обробку.

До складу магнієвих сплавів входять Mn, Al, Zn, Ce, Zr та інші. Магнієві сплави класифікують за способом виробництва на: *ливарні* (2856-79) – маркуються буквами «МЛ», з позначкою номеру по ГОСТу; *деформівні* (ГОСТ 14957-76) – маркуються «МА» з відповідним номером.

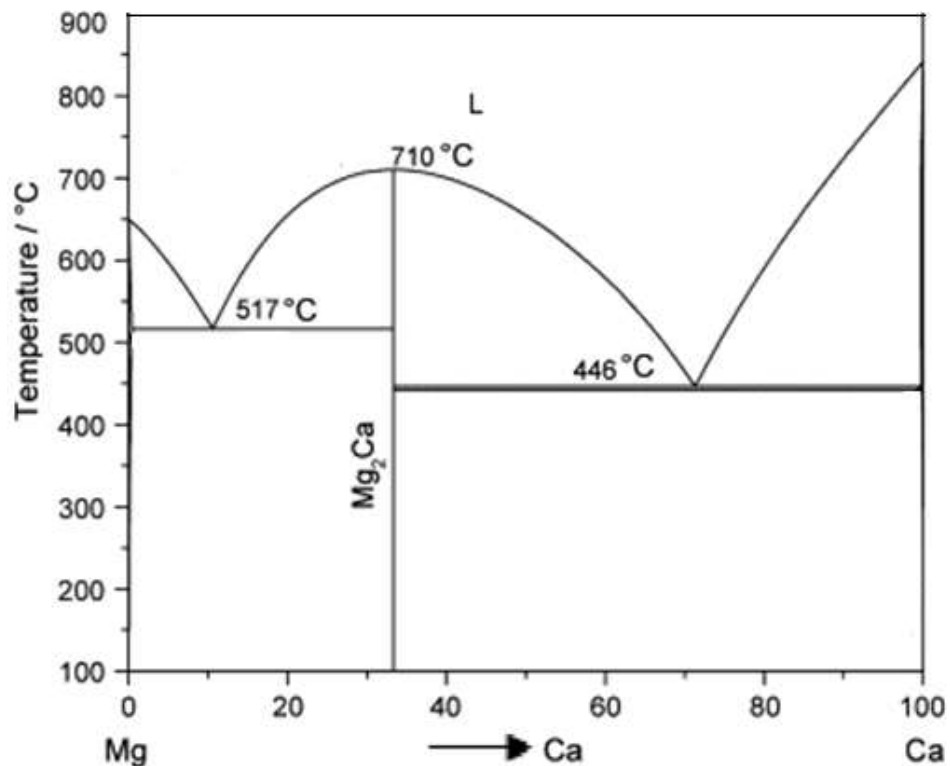


Рис. 15.3. Діаграма стану системи Mg-Ca

Магнієві сплави піддаються термічній обробці – дифузійному відпалюванню для виливків і рекристалізаційному відпалюванню після пластичної обробки.

Магнієві сплави використовують для виготовлення виробів: авіабудування (деталі коліс, двигунів, агрегатів); транспортного машинобудування (диски коліс, деталі двигунів, коробки передач, гальмівні барабани тощо).

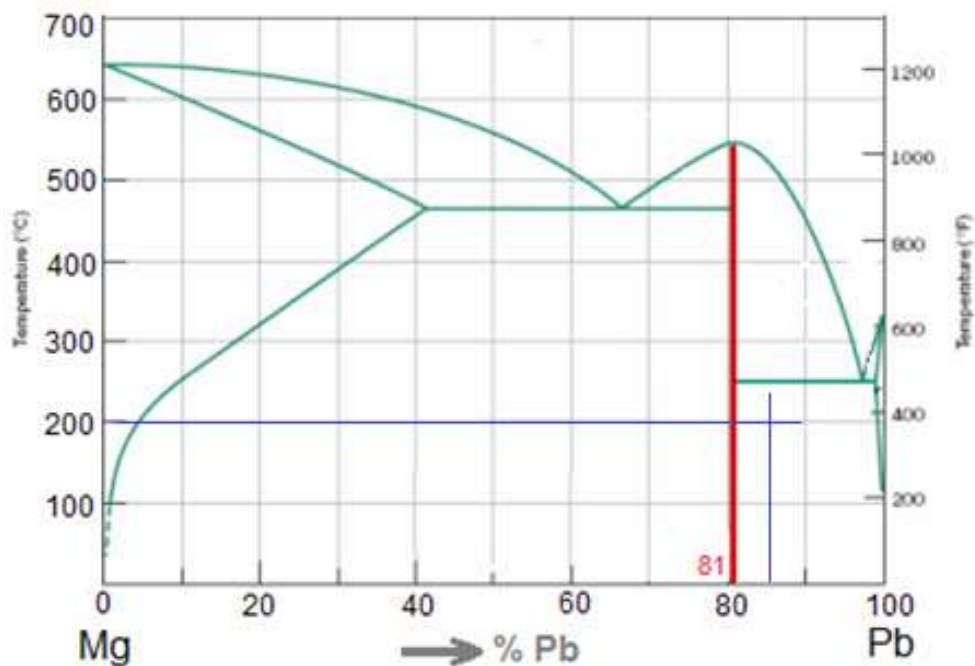


Рис. 15.4. Діаграма стану системи Mg-Pb

Титан та його сплави

Титан (Ti) – метал сріблясто-білого кольору, густиною $4,5 \text{ г/см}^3$, твердістю HB 85 і пластичністю $\delta=25\%$, має значну міцність – міцніший від заліза. Особливість титану в тому, що він легкий, його міцність майже не змінюється за умови нагрівання до 400°C , високостійкий в агресивних середовищах, тобто корозієстійкий у морській воді, багатьох кислотах і лугах. Ці властивості є наслідком утворення **на поверхні титану стійкої оксидної плівки**. Температура плавлення титану 1665°C . Титан можна зварювати в атмосфері захисних газів.

Технічно чистий титан містить незначну кількість домішок заліза, марганцю, алюмінію, вуглецю, силіцію, нікелю, кисню, азоту, водню. Виробляють титан марок ВТ1-00 (99,53 % Ti), ВТ1-0 (99,48 % Ti), ВТ-1 (99,44 % Ti). З нього виготовляють листи, труби, прутки, дріт, напівфабрикати.

Титанові сплави (рис. 15.5), до складу яких входять алюміній, вольфрам, ванадій, марганець, молибден, ніобій, хром, можуть бути одно- і двофазні.

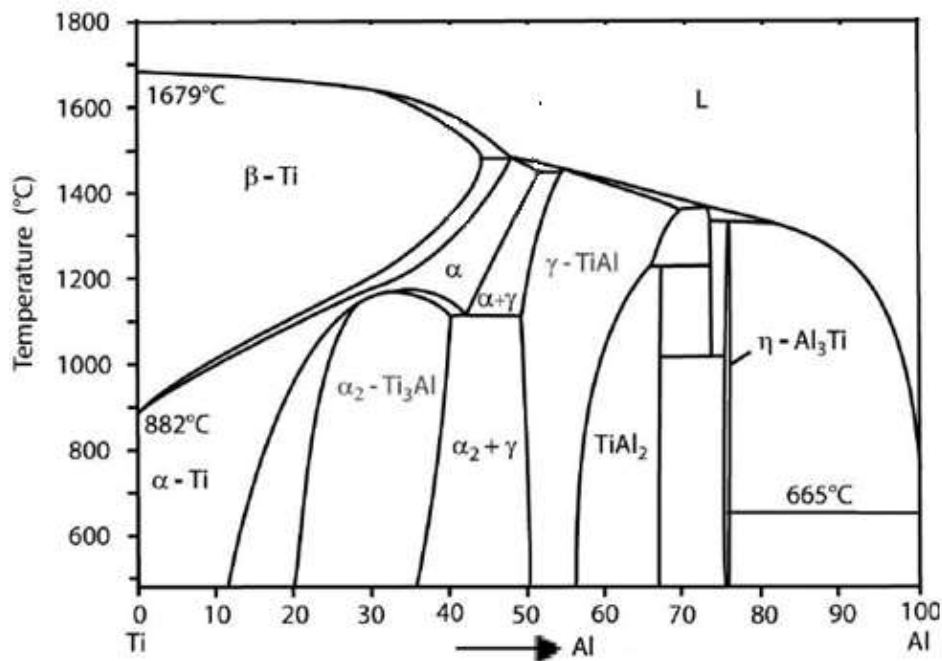


Рис. 15.5. Діаграма стану системи Ti-Al

Двофазні сплави титану характеризуються кращими якостями: питомою міцністю, стійкістю до повзучості, корозії, руйнування за високих температур і властивістю зберігати пластичність за низьких температур, тому їх **можна використовувати у криогенній техніці**. Титанові сплави – важкооброблювані матеріали, деталі з них виготовляють литтям, штампуванням, витягуванням, гнуттям. Залежно від властивостей сплави поділяють на деформівні, наприклад ВТ6, ВТ14, і ливарні – ВТ5Л, ВТ14Л, ВТ20Л. Сплави можуть бути нормальної міцності, високоміцні, жароміцні, підвищеної пластичності.

Антифрикційні сплави

Антифрикційні (підшипникові) сплави – матеріали, які використовують для виробництва вкладишів підшипників ковзання. Вони повинні мати низький коефіцієнт тертя, неоднорідну структуру, яка б сприяла затримуванню мастила, високу міцність на стиск і стирання, пластичність для притирання тертьових поверхонь і одночасно необхідну твердість, яка б не викликала інтенсивного стирання, але була б достатньою, щоб не викликати деформування. **Найкращими антифрикційними сплавами є бабіти** – сплави на олов'янистій або свинцевистій основі (рис. 15.6), які застосовують для заливання підшипників та їх вкладишів. Бабіти поділяють на олов'янисті, що містять не менше 72 % олова, олов'янисто-свинцевисті зі вмістом 5...17 % олова і 64...72 % свинцю, безолов'янисті (свинцевисті), що містять не менше 80 % свинцю.

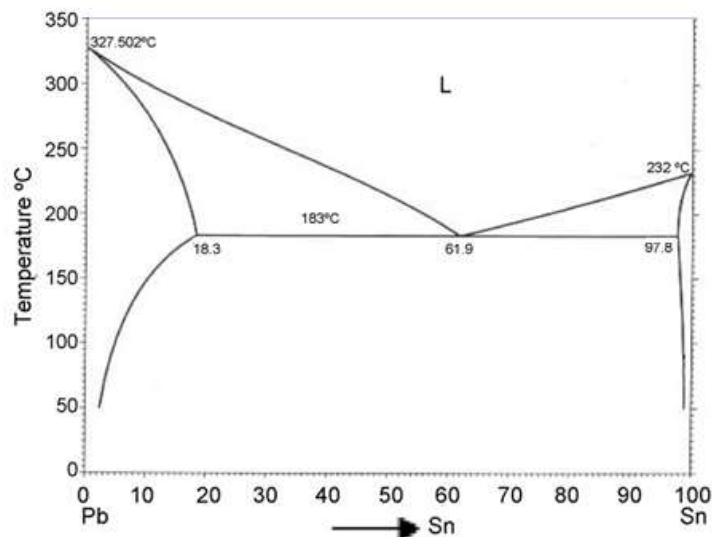


Рис. 15.6. Діаграма стану системи Pb-Sn

Бабіти позначаються літерою Б з числом, що вказує на вміст олова у сплаві. Наприклад, бабіт Б83 складається з 83 % олова, 10...12 % стибію і 5,5...6,5 % міді. Він призначений для заливання підшипників парових турбін, дизелів тощо.

До олов'янисто-свинцевистих належить бабіт Б16, що містить 15...17 % олова, 15...17 % стибію, 1,5...2 % міді, а решта – свинець. Цей сплав

застосовують для заливання підшипників парових турбін, електродвигунів, прокатних станів, дробарок тощо. До безолов'янистих належать кальцієвий бабіт – сплав з свинцевистою основою та невеликими домішками кальцію (0,75...1,1 %) і натрію (0,65...0,95 %), що використовують для заливання підшипників.

Залежно від умов роботи машини, швидкісної характеристики та температурного режиму роботи застосовують антифрикційні сплави на алюмінієвій, мідній, цинковій та інших основах, антифрикційні чавуни, пористі металокерамічні сплави, пластмаси, пластифіковану деревину тощо. Алюмінієвий антифрикційний сплав застосовують як заміник бабіту Б16 і олов'янистих бронз. Інколи ці сплави більш придатні для роботи, бо мають високі границю міцності та коефіцієнт лінійного розширення. Остання якість є недоліком у роботі, де потрібна точність.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Якими унікальними властивостями володіє алюміній?
2. Як класифікують алюмінієві сплави?
3. Які компоненти зазвичай використовують для легування алюмінієвих сплавів?
4. Надайте характеристику силуміну, дуралюмінію, авіалю та іншим поширеним сплавам алюмінію.
5. Як маркуються сплави алюмінію. Наведіть приклади.
6. Які властивості магнію та його сплавів? Як маркуються ливарні та деформівні сплави магнію.
7. Надайте характеристику титану та його сплавам. За якими ознаками класифікують сплави титану. Перелічіть галузі застосування.
8. Назвіть основні властивості, яким мають задовольняти антифрикційні сплави. Перелічіть найбільш відомі.

ЛЕКЦІЯ 16

ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ

Конструкційні порошкові матеріали

Значна частина деталей конструкційного призначення, що виготовляються традиційними методами, можуть бути замінені деталями зі сплавів, які отримують з металевих порошків пресуванням і наступним спіканням без розплавлення, тобто при температурі нижче температури плавлення основного компонента.

Порошкові матеріали виробляють з порошків металів, їхніх сплавів і тугоплавких сполук (карбідів, нітридів, боридів та ін.) методами порошкової металургії. Основною вимогою, що пред'являється до порошкових матеріалів конструкційного призначення, є забезпечення безвідмовної роботи машин, апаратів, приладів у заданих умовах, протягом всього періоду експлуатації при мінімальних витратах матеріальних і енергетичних ресурсів на виробництво продукції. Порошкові конструкційні матеріали класифікують залежно від умов їх експлуатації та ступеня навантаження (рис.16.1).

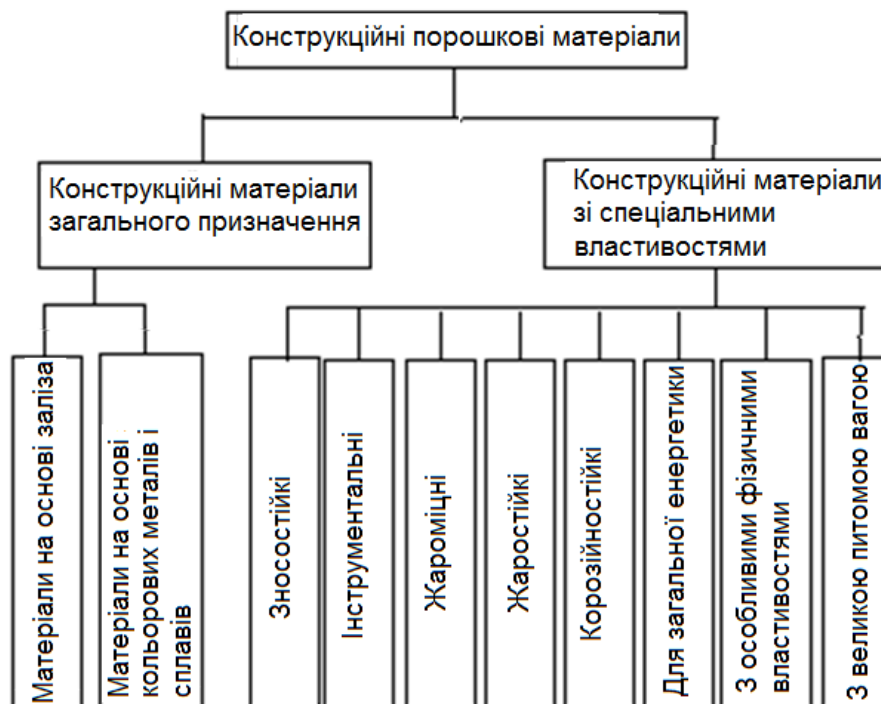


Рис.16.1. Класифікація порошкових конструкційних матеріалів

За умовами експлуатації порошкові конструкційні матеріали поділяють на дві групи: матеріали загального призначення, які замінюють звичайні вуглецеві і леговані сталі та матеріали зі спеціальними властивостями – підвищеними зносостійкістю, твердістю, жароміцністю, жаростійкістю і корозійною стійкістю, магнітними, електро- і теплофізичними властивостями.

За ступенем навантаження порошкові конструкційні вироби підрозділяють на чотири групи: малонавантажені, помірноювантажені, середньонавантажені і важконавантажені. Розділення на вказані групи проводиться залежно від межі міцності матеріалу на стиск і його пористості. Вплив пористості на модуль пружності деяких порошкових матеріалів, наприклад оксиду алюмінію, відповідає рівнянню:

$$E = E_0 (1 - 1,9P + 0,9P^2), \quad (16.1)$$

де E_0 - модуль пружності непористого матеріалу; P - пористість (об'ємна частка пор).

Експериментально доведено, що міцність порошкових конструкційних виробів залежить від пористості і описується експоненціальною залежністю:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-nP), \quad (16.2)$$

де σ_0 - межа міцності непористого матеріалу; n - константа.

Високі міцнісні властивості важконавантажених порошкових деталей, що працюють в умовах значних статичних, ударних або циклічних навантажень, можуть бути досягнуті лише при пористості менше 2%. Необхідну щільність деталям надають, при застосуванні спеціальних методів формування.

Порошкові антифрикційні матеріали

До антифрикційних матеріалів відносяться матеріали, що працюють у вузлах тертя ковзання. Вони застосовуватися в машинах і механізмах загального призначення, які широко використовуються в народному

господарстві і в побуті, а також у спеціальних галузях хімічної та металургійної промисловості.

До антифрикційних матеріалів, залежно від застосування та умов роботи, висуваються наступні вимоги:

- низький коефіцієнт тертя,
- висока зносостійкість,
- здатність утворювати шари *вторинних структур (розділових плівок)*,
- володіти об'ємною та поверхневою міцністю,
- мати високу несучу здатність,
- високу теплопровідність та ін.

Коефіцієнт тертя антифрикційних матеріалів для умов сухого тертя повинен складати 0,12-0,30, а для умов тертя з мастилом – 0,04-0,10.

Самозмащування є однією з головних переваг антифрикційних порошкових матеріалів. Даний ефект може бути досягнутий або за рахунок рідкого мастила, що знаходиться в порах матеріалу вузла тертя, наприклад підшипника, або за рахунок наявності у складі матеріалу речовин, що виконують роль твердого мастила. До таких речовин відносяться графіт, сульфід молибдену і вольфраму, нітрид бору, м'які і легкоплавкі метали, галогеніди, *фторопласт, капрон, нейлон* та ін. Ці речовини в процесі тертя сприяють утворенню розділових плівок на їх поверхнях.

Ефект самозмащування пористих виробів, що просочені рідким мастилом, полягає в тому, що при нагріванні пари тертя об'єм мастила в антифрикційному матеріалі збільшується в більшій мірі, ніж об'єм металевого каркаса. В результаті, мастило витікає з пор на поверхню і змащує її. При охолодженні вузла тертя мастило вбирається в пори під дією капілярних сил.

Антифрикційні порошкові матеріали, що використовуються для виготовлення деталей вузлів тертя (підшипники ковзання, втулки, поршневі кільця, торцеві ущільнення, шайби, підп'ятники, вкладиші тощо), можна класифікувати за складом і за призначенням.

За складом матеріали поділяються на:

- матеріали на основі міді, заліза, нікелю, кобальту, алюмінію та інших сплавів;
- матеріали на основі тугоплавких металів і сполук;
- металографітові матеріали;
- металеві двошарові матеріали на сталевій підкладці;
- матеріали на основі пористих металевих каркасів, насичених фторопластом;
- металоскляні матеріали.

За призначенням антифрикційні порошкові матеріали поділяються на матеріали, що експлуатуються:

- при наявності рідкого змащування;
- в умовах обмеженого змащення;
- в режимі самозмащування;
- без мастила в повітряному середовищі;
- у вакуумі та в середовищі інертних газів;
- при підвищених температурах;
- при високих швидкостях ковзання;
- у воді і в корозійних середовищах;
- в якості торцевих і радіальних ущільнень;
- в якості контактів ковзання і порошкових кілець.

Інші порошкові матеріали

Основою деяких фрикційних матеріалів є залізні порошки зі спеціальними добавками. Ці матеріали застосовують у гальмових системах важконавантажених машин. Фрикційними матеріалами на основі бронзи використовуються у вузлах тертя багатьох транспортних, дорожніх та інших машин.

З електроконтактних порошкових матеріалів на основі порошку вольфраму і срібла, вольфраму і міді виготовляють контакти високовольтних і надпотужних вимикачів та інших пристроїв.

З інструментальних порошкових матеріалів на основі порошку відповідної сталі виготовляють різальний інструмент, застосування якого, наприклад при обробці металів різанням і в гірничій справі, дозволили збільшити швидкість обробки металів у десятки разів.

Магнітні порошкові матеріали використовують для магнітопроводів різних приладів, реле, електромагнітних муфт; корозійностійкі – для пристроїв хімічної промисловості; пористі – для фільтрів, якими очищають повітря, рідини, паливо тощо (рис. 16.2).

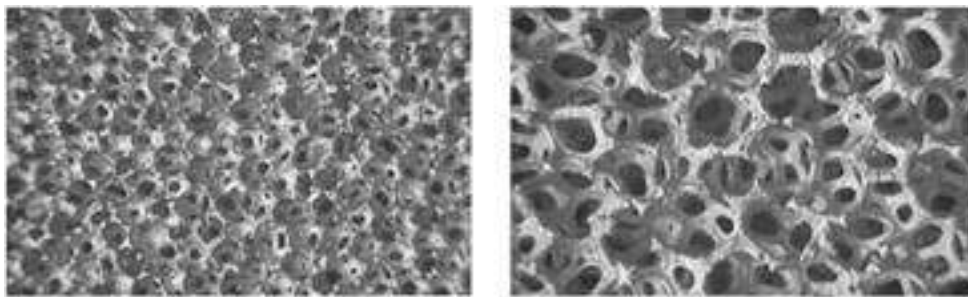


Рис. 16.2. Мікрофотографії пористих і високопористих матеріалів

Технологія порошкової металургії

Технологія порошкової металургії забезпечує одержання виробів із одного металу, наприклад заліза (такі вироби називають однокомпонентними), а також із суміші порошків металу або металів із неметалами (багатокомпонентні вироби). За цією технологією можна отримати сплави з металів, які не утворюють розчинів, не змішуються в рідкому стані (залізо – свинець, вольфрам – мідь та ін.), а також із металів з неметалами (мідь – графіт, карбід вольфраму – кобальт та ін.). Схема виробництва виробів з порошків складається з таких основних процесів: **отримання порошків і підготовка порошкової шихти, пресування (формування під тиском) і спікання відформованих виробів.**

Така схема виробництва є, майже, безвідходною і дозволяє одержувати вироби з широким діапазоном властивостей. Запровадження порошкової металургії дає значний економічний ефект. Економія відбувається за рахунок заміни дорогоцінних кольорових металів і легованих сталей, знижується трудомісткість виготовлення виробів, а також витрати електроенергії, транспортні та інші витрати.

Поряд з перевагами порошкової металургії слід відзначити і недоліки, що утруднюють і обмежують широке її поширення. До основних недоліків слід віднести високу вартість порошків металів. Вироби, одержувані з металевих порошків, внаслідок пористості володіють підвищеною схильністю до окислення, причому окислення може відбуватися не тільки з поверхні, але і по всій товщині виробу. Ці вироби мають низькі пластичні властивості (ударна в'язкість, відносне видовження).

Отримання порошків

Порошковий матеріал складається з частинок металу або сплаву з розмірами до 1 мм, що знаходяться у взаємному контакті і не пов'язаних між собою. Металеві частки практично завжди містять домішки, розподілені як по поверхні, так і у вигляді внутрішніх включень, і часто мають пори. Частинки можуть бути різноманітної форми: волокнисті або голчасті частинки, довжина яких значно перевищує їх розмір за іншими вимірами; плоскі частки (платівки, листочки), довжина і ширина яких у багато разів більше товщини; частинки з приблизно однаковими розмірами по всіх вимірах.

Порошок можна одержати *механічними методами*. При цьому комбінують різні види впливу на матеріал: статичне – стиск, динамічне – удар, зріз - стирання. Перші два види мають місце при отриманні великих часток, другий і третій - при тонкому подрібненні.

Поширеними методами отримання порошків є *розпилення зі струменя розплавленого матеріалу та грануляція розплаву*.

Розпилюванням рідких сплавів одержують порошки алюмінію, цинку, міді, легованих сталей, чавунів. Метал розплавляють у електропечах. Для розпилювання використовують повітря, азот, аргон.

Отримання порошків *фізико-хімічними методами* здійснюється в результаті хімічних реакцій (відновлення, заміщення, розкладання) і фізичних процесів (випаровування, конденсації, осадження та ін.), що протікають між твердими, рідкими і газоподібними речовинами.

Найбільш традиційними є методи осадження частинок в процесі хімічних реакцій в рідинах. Вони засновані на тих чи інших фазових перетвореннях (переохолодженні рідини, пересиченні пара, перегріву твердих солей органічних кислот, перевищенні межі розчинності і т.п.). Вважається, що ці способи найбільшою мірою дозволяють регулювати властивості одержуваних порошків.

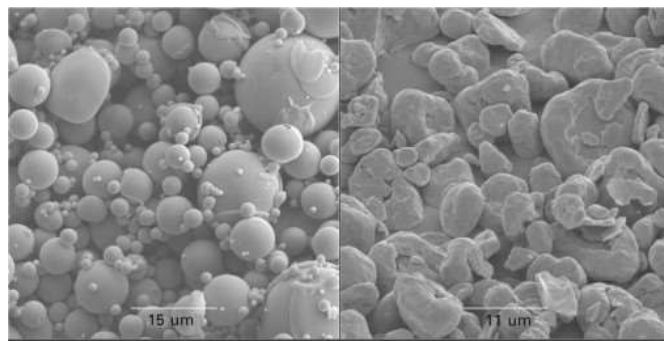


Рис. 16.3. Зразки порошку, що виготовлені шляхом газового розпилення (ліворуч) та високоенергетичного подрібнення (праворуч)

Методи контролю властивостей порошків

Хімічні властивості порошків залежать від змісту основного металу або основних компонентів, що входять до складу комплексних порошків, а також від вмісту домішок, різних механічних забруднень і газів.

Небезпечними особливостями порошків є їх займистість, вибуховість, токсичність. Займистість порошку пов'язана з його здатністю до самозаймання при зіткненні з навколишнім середовищем. Надвисока швидкість хімічної взаємодії порошку з киснем призводить до майже миттєвого виділення енергії, що супроводжується утворенням і поширенням

вибухової хвилі. Ступінь небезпеки для здоров'я людини металевого пилю залежить від його хімічного складу і ступеня окислення, розміру частинок, їх концентрації, тривалості впливу, шляхів проникнення в організм і т.д.

Пресування металевих порошків

Для пресування металевих порошків використовують прес-форми. Конструкція прес-форми залежить від наступних факторів: направлення тиску при пресуванні (одностороннє або двостороннє); способу виймання виробу з прес-форми (виштовхування або розбирання прес-форми); кількості одночасно пресованих виробів; ступіні автоматизації процесів.

Після пресування під тиском 150-300 МПа заготовки піддають спіканню в інертному або відновному середовищі для поліпшення механічних властивосте. Деякі матеріали піддають гарячому пресуванню.

Технологічні режими спікання порошків

Спікання – це нагрівання і витримка спресованих порошків при температурі нижче точки плавлення основного компонента з метою забезпечення заданих механічних та фізико-хімічних властивостей.

Для однокомпонентних систем технологічна температура спікання складає 0,6-0,9 від температури плавлення основного компонента. Багатокомпонентні системи спікають при температурі плавлення найбільш легкоплавкого компонента. В процесі проведення спікання (рис. 16.4) утворюється міцне пористе тіло з властивостями, які наближаються до властивостей компактного безпористого матеріалу.

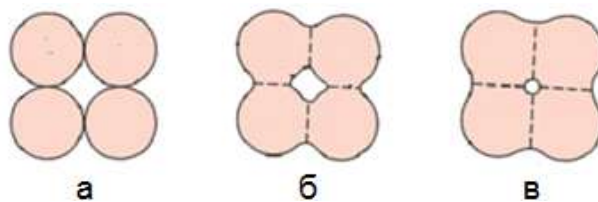


Рис. 16.4. Зміни пористості порошкових частинок (а), після пресування (б) і після спікання (в)

Під час спікання відбувається:

- зміна розмірів, структури і властивостей вихідних порошкових тіл;
- протікають процеси граничної, поверхневої та об'ємної дифузії;
- спостерігаються різні дислокаційні явища;
- протікають хімічні реакції та різні фазові перетворення;
- має місце релаксація мікро- і макронапружень;
- відбуваються процеси рекристалізації, тобто спостерігається зростання зерна матеріалу.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому переваги деталей, отриманих із застосуванням порошкової металургії?
2. Перелічить найбільш відомі групи порошкових матеріалів. Порівняйте їх властивості.
3. Які вимоги висуваються до антифрикційних порошкових матеріалів залежно від їх застосування та умов роботи.
4. В чому полягає ефект самозмащування пористих порошкових матеріалів.
5. Від чого залежить міцність порошкових конструкційних виробів.
6. Назвіть небезпечні особливості порошків
7. Від чого залежить ступінь небезпеки металевого пилу для здоров'я людини.
8. Назвіть основні операції при одержанні порошкових деталей. Навіщо потрібна операція спікання заготовок?
9. Перелічить процеси, які відбуваються під час спікання порошків
10. Опишіть переваги і недоліки механічного і фізико-хімічного методів одержання металевих порошків.

ЛЕКЦІЯ 17

КОНСТРУКЦІЙНІ НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.

ТЕРМОПЛАСТИ

Загальні відомості

Пластмаси (або пластики) – це конструкційні матеріали на основі природних або синтетичних полімерів. За певних температур і тисків вони набувають достатньої пластичності для обробки їх деформуванням і після тверднення зберігають свою форму.

Залежно від полімерної основи пластмаси поділяють на термопластичні (термопласти) та термореактивні (реактопласти), які поведуть себе при нагріванні так само, як і відповідні полімери. Прості пластмаси складаються з чистих полімерів.

Для поліпшення технологічних та експлуатаційних властивостей полімерів і створення складних пластмас до полімерної основи додають різні компоненти. Основними компонентами пластмас є зв'язувальні речовини, наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, мастила, отверджувачі, барвники та інше. У більшості випадків, пластмаси представляють собою складну суміш компонентів, в якій власне полімер є зв'язувальною речовиною.

Для зниження витрат полімерів і надання їм твердості, жорсткості, міцності, антифрикційних або фрикційних властивостей до складу пластмас вводять наповнювачі (до 40...70 %), які можуть бути тканинними, порошкоподібними, волокнистими, шаруватими та газоподібними. В якості наповнювачів застосовують кварцову, азбестову, деревну муку, плавиковий шпат, азбестове й скляне волокно, папір, бавовняні тканини, деревний шпон тощо.

Пластифікатори (стеарин, олеїнова кислота, дибутилфталат) надають пластмасам більшої пластичності, знижують температурний інтервал переходу у в'язкотекучий стан, полегшують їх обробку.

Для запобігання частковій термічній деструкції в деякі пластмаси додають стабілізатори, а щоб запобігти окиснювальній деструкції, вводять антиоксиданти – речовини, які гальмують окиснювальні процеси.

При виготовленні дрібних, але складних за формою виробів методами пресування або лиття, в пластмаси вводять легкоплавкі воскоподібні мастила у кількості до 1 %, які змащують поверхні виробу й зменшують тертя між поверхнями та формою. Для утворення міжмолекулярних зв'язків і отвердіння в пластмаси додають отверджувачі. Для забарвлення виробів із пластмас у композицію вводять барвники або закаламутнювальні речовини.

Змінюючи склад компонентів і кількісне співвідношення їх, можна змінювати властивості пластмас у широкому діапазоні.

За призначенням пластмаси поділяються на такі основні групи: конструкційні, ущільнювальні, триботехнічні (фрикційні та антифрикційні), електроізоляційні, теплоізоляційні, термо -, вогне -, кислотійкі, декоративні. Залежно від методів переробки пластмас їх поділяють на ливарні, штампівні, пресівні.

Термопласти

Основу термопластичних пластмас становлять полімери з лінійною і розгалуженою структурою. Роботоздатність термопластів зберігається до 60...70 °С, після чого їхні фізико-механічні властивості істотно знижуються. Деякі спеціальні термостійкі термопласта роботоздатні за температур 150...200 °С і навіть до 400 °С.

Поведінка термопластів під навантаженням залежить від його характеру. Тривале статичне навантаження спричиняє еластичну деформацію й зниження міцності. Під дією швидкісного деформування термопласти стають жорсткими й руйнуються крихко.

До найбільш поширених термопластів належать пластмаси на основі поліетилену, поліпропілену, полістиролу, полівінілхлориду, поліамідів, полікарбонатів, політетрафторетилену.

Поліетилентерефталат (лавсан) є складним полієфіром. Це кристалічний полімер, який має високу хімічну й морозостійкість (до 70 °С). Його границя міцності невелика (17,5 МПа), але може бути збільшена за рахунок потрібної орієнтації макромолекул. Внаслідок швидкого охолодження лавсан може набути аморфної структури. Його використовують для виготовлення полієфірних волокон, тканин, плівки, канатів, пасів, зубчастих коліс тощо.

Поліетилен за температури 60 °С стає високоеластичним, а при 110...115 °С набуває високої пластичності й може формуватись у виробі складної конфігурації. Поліетилен морозостійкий за температури до -50 °С і нижче. За звичайної температури він набухає в бензині, бензолі, толуолі, ксилолі, хлороформі, діетиловому спирті. Внаслідок набухання міцність поліетилену знижується. Теплостійкість поліетилену з рідкосітчастою структурою, яку одержують радіоактивним опромінюванням, становить близько 100 °С.

Поліпропілен відрізняється від поліетилену більшою середньою молекулярною масою й менше піддається окиснювальній деструкції. З поліетилену й поліпропілену виготовляють труби, листи різної товщини, з яких штамнують деталі приладів, облицьовувальні матеріали, тару для агресивних середовищ, плівкові пакувальні матеріали.

Деталі з'єднують контактним зварюванням із нагріванням шва до 175...185 °С. Міцність зварних швів за звичайної температури дорівнює міцності самого матеріалу. Деталі з поліетилену й поліпропілену виготовляють за температур 150...250 °С під тиском 7...20 МПа. Залежно від розмірів виробів їх видержують у формі протягом 10...30 с. Вироби складної конфігурації піддають термообробці в гарячій (70...80 °С) воді. Механічну обробку виконують на токарному верстаті за швидкості різання 700...1000 м/хв і швидкості подачі 0,1...0,2 м/об. Такий режим різання запобігає нагріванню деталей.

Фторопласти є високоякісними діелектриками. Найпоширеніші фторопласти -4, -4Д, -3, -3М. Вироби з фторопласту-4Д за всіма фізико-механічними властивостями ідентичні виробам із фторопласту-4. Фторопласт-3М і фторопласт-3 мають приблизно однакові механічні властивості (табл. 17.1). Деталі з цих полімерів (підшипники ковзання, прокладки, ущільнювачі тощо) виготовляють методом лиття або екструзії.

Таблиця 17.1 – Механічні властивості деяких фторопластів

Механічні властивості	Фторопласт-3	Фторопласт-4
Температура плавлення, °С	208...210	327
Гранична робоча температура, °С	125-195	260-269
Температура руйнування, °С	310	415
Тимчасовий опір при розтягу, МПа	35...40	14...35
Відносне видовження при розриві, %	30...200	250...500
Тимчасовий опір при статичному згинанні, МПа	60...80	11... 14
Модуль пружності при згинанні, МПа	1160...1450	470...850
Ударна в'язкість, кДж/м ²	2...16	10
Число твердості за Брінелем, НВ	100...130	30...40

Поліаміди – це кристалічні пластики (капрон, нейлон та ін.), які мають високу стійкість проти олив, спирту, лугів, бензину, низький коефіцієнт тертя та високу міцність при стиранні, значну механічну міцність і пружність, демпфувальні властивості (табл. 17.2).

Таблиця 17.2 - Механічні властивості деяких поліамідів

Механічні властивості	Поліамід 65 (нейлон)	Поліамід 6 (капрон)	Поліамід 68
Густина, г/см ³	1,14	1,14	1,13
Температура плавлення, °С	250...260	218...220	213...220
Теплостійкість, °С	55...60	50...55	60
Вологостійкість, %	1,2...1,6	3,5...4,0	від 2,5
Границя міцності, МПа при:			
– розтягу	70...100	60...65	45...50
– стиску	70...100	70...80	70...80
– згинанні	80...100	70...90	80...90
Відносне видовження при розриві, %	100...500	200	100

Істотними недоліками поліамідів є їхні низька морозостійкість (–35... –45 °С), нестійкість до розчинів кислот і окиснювачів, мала

атмосферостійкість і різке зниження міцності за температури, вищої від 100 °С. У процесі старіння поліамідні волокна жовтіють, втрачають еластичність і міцність. Причиною старіння є реакція волокна з киснем повітря, що прискорюється під дією сонячного випромінювання й підвищених температур.

Із поліамідного волокна виготовляють високоміцні шинні корди, трансмісійні стрічки, канати, щетини й рибальські сітки, шестерні, підшипники та різні деталі загального призначення.

Поліаміди стійкі до олів, розчинників, слабких кислот, мають низький коефіцієнт тертя, можуть експлуатуватися за температури 300 °С і вище. З них виготовляють плівки, ущільнювальні елементи й різні деталі машин.

Поліформальдегід застосовують для виготовлення шестерень, підшипників, клапанів, кілець для кріплення кришок, рукояток, втулок та ін. Порівняно з поліамідом має вищу морозостійкість, абсолютну водостійкість, стійкий до мінеральних олів і бензину, атмосферних впливів та окиснювальних середовищ, але у розчинах кислот або лугів поступово руйнується.

Пентапласт виготовляють із формальдегіду. Він зберігає міцність до температури 100 °С. Пентапласт хімічно стійкий проти атмосферних впливів. Має таку саму водостійкість, як і фторопласт, поліетилен і полістирол. Пентапласт використовують для виготовлення хімічно стійких труб, клапанів, вентилів, сепараторних кілець, підшипників, деталей годинникових механізмів.

Органічне скло – світлопрозорі термопластичні матеріали, тверді, безбарвні, атмосферостійкі. Органічне скло відрізняється від силікатного низькою густиною, пружністю, відсутністю крихкості до 60 °С, високою світлопрозорістю, легкістю формування та механічної обробки, надійним зварюванням і склеюванням. Однак, на відміну від силікатного скла, має менші твердість і теплостійкість. Крім того, воно легкозаймисте. Органічне

скло не руйнується у водних розчинах кислот і лугів, але набухає у бензині, оливі, а також у спиртах. Розчинюється в дихлоретані, оцтовій кислоті, ацетоні. Листи з оргскла добре піддаються контактному зварюванню за температури 140...150 °С і тиску 0,5...1,0 МПа.

Промисловістю випускається органічне скло марки СОЛ, яке є пластифікованим аморфним поліметилметакрилатом. За температури понад 90...95 °С це скло починає деформуватися під навантаженням, його поверхня стає м'якою. За температури більш як 180 °С в органічному склі, внаслідок випаровування пластифікатора, утворюється газ, і на поверхні з'являються пухирці.

Оргскло рекомендують використовувати як пружний твердий світлопрозорий листовий матеріал, що працює в температурному інтервалі від -50 до +80 °С, а штампувати з нього вироби слід за температур 105... 150 °С. Для штампування можна застосувати дерев'яні або пластмасові штампи, обтягнуті замшею

Оргскло широко застосовують для виготовлення лінз, ілюмінаторів літаків та ін. Останніми роками створено нові види високоякісного органічного скла з високими експлуатаційними властивостями.

У промисловості широко використовують термопласта з різними наповнювачами (волокном, склотканиною тощо), а як зв'язувальну речовину застосовують термопластичні полімери. Наприклад, для підвищення міцності поліамідів до 90...150 МПа їх армують скляним капроновим або лавсановим волокном. У шаруватих термопластах використовують склотканину. Наприклад, капрон у композиції зі склотканиною має міцність 400...430 МПа і працює за температури до 220 °С.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Надайте загальну характеристику пластмасам.
2. Які наповнювачі вводять до пластмас для підвищення механічних властивостей?
3. Назвіть речовини, які надають пластмасам більшої пластичності, знижують температурний інтервал переходу у в'язкотекучий стан, полегшують їх обробку.
4. Поясніть, яким чином запобігають деструкції пластмас.
5. Як класифікують пластмаси за призначенням і методами переробки.
6. Що розуміють під термопластами. Як термопласти реагують на температуру і навантажування.
7. Охарактеризуйте найбільш поширені термопласти, наприклад, поліамід і фторопласт.

ЛЕКЦІЯ 18

КОНСТРУКЦІЙНІ НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.

РЕАКТОПЛАСТИ

Реактопласти

Терморективні пластмаси виготовляють на основі терморективних полімерів (зв'язувальної частини) з різними наповнювачами.

Найпоширенішими зв'язувальними речовинами є епоксидні, феноло-формальдегідні, кремнієорганічні та поліімідні смоли. Основними вимогами до цих речовин є високі адгезія, тепло- та хімічна стійкість, мала усадка. Теплостійкість реактопластів залежить від типу зв'язувальної смоли. Епоксидні смоли забезпечують тривалу експлуатацію за температур до 200 °С, феноло-формальдегідні – до 260 °С, кремнієорганічні – до 370 °С, поліімідні – до 350 °С.

Залежно від форми включень наповнювача реактопласти поділяють на порошкові, волокнисті, шаруваті.

У порошкових реактопластах (прес-порошках) як наповнювач використовують органічні (деревна мука, целюлоза) й мінеральні (кварц, азбест, графіт, крейда, тальк) порошки. Для надання певних властивостей застосовують комбінацію зв'язувальних смол, наприклад, феноло-формальдегідну смолу змішують з аніліноформальдегідною. Наповнювачем для суміщених смол є мінеральні порошки з азбесту, кварцу, крейди.

Порошкові реактопласти характеризуються невисокими механічними властивостями (30..60 МПа), низькою ударною в'язкістю й задовільними електроізоляційними властивостями. Відповідно до цього їх застосовують для виготовлення малонавантажених деталей, елементів несилкових конструкцій, електроізоляційних деталей. Прес-порошки на основі епоксидних смол застосовують для усунення дефектів лиття, в інструментальному виробництві для виготовлення оснастки, для відновлення зношених деталей і т. п.

Волокнисті реактопласти (табл. 18.1) поєднують у собі зв'язувальну речовину (смоли) й волокнистий наповнювач – бавовняні пачоси, азбоволокно. Їхня теплостійкість становить не більше ніж 130...140 °С. За температур понад 140 °С, особливо під навантаженням, відбувається термічна деструкція виробу, й міцність матеріалу істотно зменшується.

Таблиця 18.1 - Механічні властивості деяких волокнистих реактопластів

Механічні властивості	Волокніт	Азбоволокніт К-6	Фаоліт	Азбовініл	Волокніт К-41-5	Скловолокніт СВН-12
Густина, г/см ³	1,35...1,45	1,95	1,5...1,65	1,54...1,64	1,64	1,7
Теплостійкість, °С	110...120	200...250	150	150	350	150
Ударна в'язкість, кДж/м ²	9...11	18...21	3,5...5,5	3,5...5,5	18	30
Границя міцності, МПа при:						
розтягу	30...35	30	30	15...21	–	130
стиску	120...130	110	50...90	25...38	130	–
згині	50...60	70	30...60	–	50...60	160

Азбоволокніти застосовують для виготовлення електроізоляційних виробів (контакторів, клемних коробок), що працюють за температур 200...300 °С в умовах електричного розряду. Крім того, азбоволокніти мають високі ударну міцність і фрикційні властивості й використовуються в гальмових пристроях.

Скловолокніти характеризуються високою хімічною й термічною (до 280 °С) стійкістю, а також високою міцністю (80...500 МПа).

Неорієнтовані скловолокніти містять коротке волокно, що дає змогу виготовляти деталі складної форми. Завдяки достатньо високій міцності такі скловолокніти використовуються для ущільнювачів насосів, силових електротехнічних деталей тощо. Скловолокніти на основі скляних матів застосовують для виготовлення великогабаритних виробів простої форми (корпусів човнів, кузовів автомобілів і приладів і т. п.).

Орієнтовані скловолокніти (АГ-4С, ВМ-1) містять довгі волокна, які закономірно розташовуються окремими сталками, що склеюються між собою. Така структура дає змогу підвищити міцнісні характеристики порівняно зі звичайними склопластиками в 3...5 разів. Орієнтовані скловолокніти використовують для виготовлення високоточних деталей складної конфігурації (в тому числі з різьбою).

Виготовляючи вироби технічного призначення, у феноло-формальдегідну смолу вводять такі наповнювачі, як папір, бавовняна тканина або деревний шпон. При виготовленні виробів побутового призначення зв'язувальною речовиною є сечовино-формальдегідна смола.

Шаруваті реактопласти (табл. 18.2) різняться видом наповнювача: гетинакс – із папером; текстоліт – із бавовняною тканиною; азботекстоліт – з азбестовою тканиною; деревноволокнисті пластики (ДВП) – із деревним шпоном; склотекстоліт – зі скляною тканиною. Із шаруватих пластмас зазвичай виготовляють пресовані листи, плитки різної товщини, трубки різних діаметрів, диски тощо (рис. 18.1).



Рис. 18.1. Вироби із текстоліту

Таблиця 18.2 - Механічні властивості деяких шаруватих реактопластів

Механічні властивості	Деревно-волокнистий пластик	Текстоліт	Азботек - століт	Гетинакс
Густина, г/см ³	1,53	1,3...1,4	1,5...1,7	1,3...1,4
Вологомісткість, %	5...18	0,8...1,5	3	1...2,5
Границя робочої температури, °С	110...120	110...120	200	110...120
Границя міцності, МПа при:				
– розтягу	2,2...3,0	0,8...1,0	0,8	0,8...1,0
– стиску	1,6...1,8	2,3...2,5	0,85	3,0...3,2
– згинанні	2,8	1,2...1,45	1,2...1,7	1,0...1,3
Модуль пружності при розтягу, Па	–	5000	20000	10000
Теплостійкість, °С	140...150	120...125	200	130...150

Газонаповнені полімери (пінопласти) – це матеріали, що складаються з твердої полімерної матриці, в якій розподілені замкнені або сполучені (поропласти) комірки (пори), наповнені вуглекислим газом або азотом.

Пористої структури можна надати будь-якому полімеру, причому пінопласт буває еластичним, жорстким або напівжорстким. Пінопласти виробляють під надлишковим або нормальним тиском і самоспіненням. Під надлишковим тиском у термопластичних полімерах утворюється пориста структура. Під нормальним тиском пінопласти виготовляють із полімерів-отверджувачів і термопластів, самоспіненням – із полімерів за інтенсивного виділення газу.

Пінопласти, на відміну від поропластів (губок), не є вологомісткими матеріалами, оскільки газові комірки в них ізольовані одна від одної. Завдяки низькій вологомісткості пінопласти зберігають діелектричні та високі теплоізоляційні властивості в умовах підвищеної вологості навколишнього середовища.

Пінопласти з полістиролу й поліхлорвінілу зберігають пористу структуру до температури 60 °С. Вище від цієї температури відбувається

поступова дифузія газів, зростає об'ємна маса, збільшується усадка, внаслідок чого виріб жолобиться.

Пінопласти з полістиролу легкозаймисті, швидко набухають у бензині й оливі, розчиняються в різних органічних середовищах.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення реактопластам.
2. Вкажіть найпоширеніші зв'язувальні речовини термореактивних полімерів і основні вимоги до них.
3. Охарактеризуйте порошкові реактопласти. Які речовини використовують в якості наповнювача.
4. Охарактеризуйте волокнисті реактопласти, їх властивостям та застосування.
5. Порівняйте скловолокніти неорієнтовані та орієнтовані. В чому полягають їх особливості, перелічить переваги і недоліки.
6. Охарактеризуйте шаруваті реактопласти. Який асортимент вироби з них виготовляють.
7. Яку будову мають пінопласти. Перелічить їх унікальні властивості.
8. Як будова пінопластів впливає на механічні характеристики.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 188 с.
2. Скуріхін В. І. Матеріалознавство та технологія матеріалів : конспект лекцій для студентів 2 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 263 – Цивільна безпека / В. І. Скуріхін, Н. В. Гарбуз; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 59 с.
3. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Конспект лекцій. Ч.ІІ / Уклад. Є.Г. Афтанділянц, О. В. Зазимко, К.Г. Лопатько, А.В. Поліщук. – Київ: НУБіП, 2016. – 322 с.
4. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 163 «Біомедична інженерія», для всіх спеціалізацій / І. Ю. Худецький, К. В. Ляпіна, Ю. В. Антонова-Рафі; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 6,19 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 147 с.
5. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Фізичне матеріалознавство» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 104 Фізика та астрономія всіх форм навчання / Укл.: Лисенко О.Б, Калініа Т.В. Кам'янське, ДДТУ, 2019-64 с.
6. Шаповал С. В. Конспект лекцій з дисципліни «Матеріалознавство» (для студентів 2 курсу денної форми навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології) / С. В. Шаповал ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 122 с.

7. Кшнякін В. С. Основи фізичного матеріалознавства : навч. посіб. : у 2 ч. / В.С. Кшнякін, А. С. Опанасюк, К. О. Дядюра. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – Ч. 2. – 291 с. ISBN 978-966-657-586-2, ISBN 978-966-657-588-6.
8. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. К.: Вища освіта, 2012.- с 548.
9. Callister, William D. Materials Science and Engineering: an introduction / William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch – 9th ed. Copyright 2014, John Wiley & Sons, Inc. <https://anupturnedworld.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/06/callister-materials-science-and-engineering.pdf>