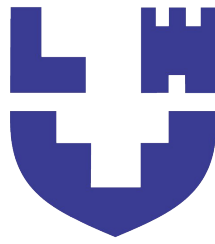


Міністерство освіти та науки України



МЕТАЛОЗНАВСТВО

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг»
спеціальності G8 Матеріалознавство
галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 621.783 (07)

3 32

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Рекомендовано до видання вченою радою факультету митної справи, матеріалів та технологій ЛНТУ, протокол № ____ від « ____ » _____ 2026 року.

Голова вченої ради факультету ММТ _____ В.В. Ткачук

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри товарознавства та експертизи в митній справі ЛНТУ, протокол № ____ від « ____ » _____ 2026 року.

Завідувач кафедри матеріалознавства ЛНТУ _____ Н.Ю. Імбирович

Укладач: _____ І.В. Боярська, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ

_____ Н.П. Зайчук, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

Рецензент: _____ Д.А. Гусачук, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

Відповідальний

за випуск: _____ Н.Ю. Імбирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства ЛНТУ.

3 32 **Металознавство:** конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. І.В. Боярська, Н.П. Зайчук – Луцьк : ЛНТУ, 2026. – 121 с.

Видання містить конспект лекцій з курсу дисципліни «Металознавство», перелік джерел для підготовки студентів до виконання практичних занять. Призначене для студентів спеціальності G8 Матеріалознавство.

О 75 Металознавство: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. І.В. Боярська, Н.П. Зайчук – Луцьк : ЛНТУ, 2026. – 121 с.

Видання містить конспект лекцій з курсу дисципліни «Металознавство», перелік джерел для підготовки студентів до виконання практичних занять. Призначене для студентів спеціальності G8 Матеріалознавство.

Комп'ютерний набір

І.В.Боярська

Редактор

І.В. Боярська

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.

Ум. друк. арк. 6,75. Обл.-вид. арк. 6,2.

Тираж ___ прим. Зам. 1.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
ВП ЛНТУ

Зміст

ТЕМА №1 Вступ. Класифікація металів. Типи зв'язку. Атомно-кристалічна структура металів.....	3
ТЕМА № 2 Будова металів. Ізотропія, анізотропія в кристалах і металах...	10
ТЕМА №3 Кристалізація металів. Термодинамічні основи фазових перетворень металів.....	16
ТЕМА № 4 Поняття про механічні, фізичні, хімічні та технологічні властивості металів і сплавів	22
ТЕМА № 5 Теорія сплавів. Методи побудови діаграми стану сплавів.....	26
ТЕМА № 6 Основні типи діаграм стану сплавів. Діаграми стану подвійних систем.....	35
ТЕМА № 7 Діаграма стану залізо-вуглець, фазовий склад, структурні складові залізобуглецевих сплавів та їх властивості.....	41
ТЕМА № 8 Фізичні методи дослідження структури металів і сплавів.....	46
ТЕМА № 9 Вуглецеві сталі. Класифікація, маркування та використання...	63
ТЕМА № 10 Машинобудівні чавуни. Структура, властивості та використання.....	69
ТЕМА №11 Вплив домішок на структуру і властивості чавуну.....	77
ТЕМА № 12 Теорія легування. Класифікація легованих сталей та їх використання в машинобудуванні. Основи теорії легування сталей.....	79
ТЕМА 13 Вплив легуючих елементів на критичні точки, структуру та властивості сталей.....	83
ТЕМА 14 Класифікація і маркування легованих сталей.....	92
ТЕМА № 15 Класифікація, маркування та призначення іноземних сталей та сплавів.....	97
Список використаних джерел	121

ТЕМА №1 Вступ. Класифікація металів. Типи зв'язку. Атомно-кристалічна структура металів

Класифікація металів

Метали – найбільш розповсюджені у природі елементи. Це хімічно прості речовини, які мають особливий металевий блиск, високу пластичність, електро- та теплопровідність. У техніці поняття "метал" означає речовину, що має характерні властивості. З точки зору хімії, метали (їх близько 80) – це елементи, атоми яких складаються з позитивно зарядженого ядра, навколо якого на різній відстані обертаються негативно заряджені електрони, утворюючи певні електронні оболонки. Зовнішня електронна оболонка металів містить невелику кількість електронів (1...2). Сила притягання ядра атома щодо зовнішніх (валентних) електронів значною мірою компенсується електронами внутрішніх оболонок. Тому атоми металів досить легко втрачають зовнішні електрони і перетворюються на позитивно заряджені іони. Вільні електрони легко переміщуються в усіх напрямках між утвореними позитивно зарядженими іонами, нагадуючи рух частинок газу ("електронний газ").

Типи зв'язків у кристалічних і поліморфних речовинах.

Тип зв'язку між елементарними частинками в твердому тілі (кристалі) визначається електронною будовою атомів, які взаємодіють. Найважливіші зв'язки: іонний, ковалентний і металевий. Тип зв'язку істотно впливає на властивості матеріалу.

Іонний зв'язок виникає між різнорідними атомами, наприклад натрію і хлору, один з яких віддає свій валентний електрон і перетворюється у позитивно заряджений іон (Na^+), а інший приймає електрон і стає негативно зарядженим іоном (Cl^-). Отже, іонний зв'язок обумовлюється електростатичною взаємодією протилежно заряджених іонів. Такий зв'язок типовий для неорганічних сполук. У більшості випадків іонні кристали - діелектрики.

Ковалентний зв'язок створюється за рахунок об'єднання валентних електронів сусідніх атомів у одному енергетичному рівні (зовнішній орбіті). Об'єднані електрони належать водночас обом атомам і перебувають на спільній орбіті. Ці електрони мають протилежно скеровані спіни і взаємодіють як два електромагніти. Ковалентний зв'язок утворюють як однорідні атоми (кремній, вуглець в кристалічній ґратці алмазу), так і різнорідні (залізо – вуглець у хімічній сполуці Fe_3C , алюміній – азот у хімічній сполуці AlN). Ковалентний зв'язок дуже міцний. Багато кристалів з таким зв'язком відзначаються високою температурою плавлення, значною твердістю (карбіди, нітриди) і суттєвою зносостійкістю.

Металевий зв'язок реалізується за рахунок електростатичної взаємодії між позитивно зарядженими іонами та негативно зарядженими вільними електронами. Валентні електрони атомів металу порівняно легко втрачають зв'язок зі своїми ядрами, утворюючи так званий електронний газ. Металевий зв'язок не скерований в одному напрямку. Добра електро- і теплопровідність металів забезпечується вільними електронами. Існування водночас нейтральних

й іонізованих атомів та вільних електронів є основою уявлень щодо особливого типу міжатомного зв'язку, притаманного тільки металам, - металевому. У метали постійно відбувається обмін електронами між нейтральними та іонізованими атомами, завжди є певна кількість електронів, що на даний момент не належать якомусь з атомів. Якщо створити у металі різницю потенціалів, рух електронів набуде певного напрямку і виникне електричний струм. Наявністю вільних (колективізованих) електронів пояснюють існування спільних для всіх металів властивостей (пластичність, непрозорість, блиск, високі електро- і теплопровідність), а їх кількістю – різний ступінь "металевості" окремих металів. Метал як хімічний елемент може бути компонентом, тобто речовиною, яка утворює систему і входить до складу сплавів з двох або кількох елементів. Властивості металів зумовлює їх атомна будова і кристалічна структура. Залежно від будови і властивостей метали об'єднують у різні групи. За загальною і найбільш поширеною класифікацією метали поділяють на дві групи: чорні і кольорові. До чорних металів належать залізо та його сплави (сталь, чавун), а до кольорових – решту металів.

Чорні метали мають темно-сірий колір, більш високі температури плавлення, значну твердість і щільність, здатні до поліморфних перетворень (крім Ni). Серед них розрізняють: залізні – Fe, Co, Ni, Mn; тугоплавкі – температура плавлення яких вища за температуру плавлення заліза (понад 1539 °C) – W, Mo, Re, Nb, Ti, V, Cr; уранові – актиніди; рідкісноземельні (РЗМ) – La, Ce, Nd, Pr та інші. У техніці використовується понад 90 % чорних металів.

До **кольорових** належить решта металів. Характерним для них є забарвлення (червоне, жовте, біле), висока пластичність, низька твердість, відносно низька температура плавлення, відсутність поліморфізму. Типовим представником групи кольорових металів є мідь і сплави на її основі (бронза, латунь).

Серед кольорових металів розрізняють: легкі – Be, Mg, Al; благородні – Ag, Au, Pt та метали платинової групи - Pd, Ir, Os, Ru, Rh; "напівблагородні" – Cu; легкоплавкі – Zn, Cd, Hg, Sn, Pb, Bi, Tl, Sb; елементи з послабленими металевими властивостями – Ga, Ge. Кольорові метали додають до складу легированих сталей і сплавів для поліпшення їхньої структури та властивостей, а також використовують для виготовлення різноманітних виробів.

Атомно-кристалічна структура металів

Під атомно-кристалічною структурою розуміють взаємне розташування атомів (іонів) у реальному кристалі. Залежно від будови (розташування атомів) тверді тіла поділяють на *аморфні* і *кристалічні*.

Аморфні характеризуються хаотичним розташуванням атомів. Тому, зберігаючи постійну форму, вони не мають певних (критичних) температур плавлення та кристалізації. Залежно від зовнішніх умов їхні властивості змінюються поступово. Аморфний стан металів реалізується за умов інтенсивного охолодження під час кристалізації.

Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри.

За звичайних умов кристалізації метали у твердому стані мають кристалічну будову. Для кристалічного стану характерно, перш за все, певне закономірне розташування атомів у просторі. Кожен атом (іон) у кристалі

оточений певною кількістю найближчих атомів (сусідів), розташованих на однаковій відстані від нього. Розглянемо схему розташування атомів (позитивно заряджених іонів) в одній площині. Уявні лінії, проведені через центри атомів, утворюють ґратку, у вузлах якої знаходяться атоми металу, так звану *кристалографічну площину* (рис. 1.1,а). Багаторазове повторення таких площин у просторі, розташованих паралельно, відтворює просторову кристалічну ґратку (рис. 1.1, б). Взаємне розташування у просторі атомів реальних металів і відстань між ними визначають за допомогою рентгеноструктурного аналізу. Розташування атомів у кристалі зручно зображувати у вигляді просторових схем – елементарних кристалічних ґраток. Під цим розуміється найменший комплекс атомів, що дозволяє відтворити при багатократному повторенні просторову кристалічну ґратку (рис. 1.2). Кристалічна будова характеризується закономірним, геометрично правильним розташуванням атомів (іонів) у просторі. Атоми (іони) металу перебувають на такій регулярній відстані між собою, при якій енергія взаємодії позитивно і негативно заряджених частинок мінімальна. Якщо через центри атомів кристалу провести лінії, то отримаємо просторову ґратку, а якщо через ряди атомів провести площини, то утвориться безліч однакових елементарних геометричних фігур. Виділимо в просторовій ґратці кристалу такий об'єм, що дає уявлення про будову всього кристалу, і назовемо цей об'єм *елементарною кристалічною ґраткою*.

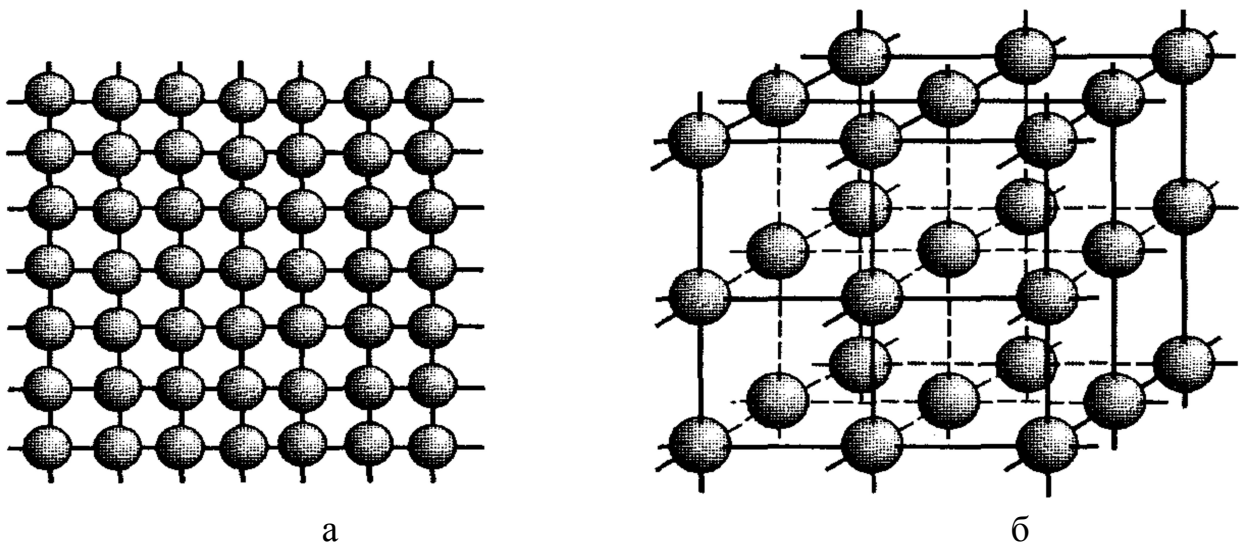


Рисунок 1.1 Схема розташування атомів металу у кристалографічній площині (а) та в просторі кристалічної ґратки (б)

Отже, елементарною кристалічною ґраткою називається такий найменший об'єм, який дає нам уявлення про взаємне розташування атомів у всьому кристалі. Просторове розташування атомів у кристалічному тілі залежить від природи металу, характеру міжатомних зв'язків, температури, тиску. Прагнення атомів до найбільш щільного розміщення призводить до значної кількості комбінацій їхнього взаєморозташування. Серед промислових металів найпоширенішим є утворення трьох основних типів кристалічних ґраток: об'ємноцентрованої кубічної (ОЦК), гранецентрованої кубічної (ГЦК) і гексагональної щільного пакування (ГЩП).

У об'ємноцентрованій кубічній ґратці (рис. 1.2, а) атоми розташовані у вершинах куба і один атом у центрі куба. Таку кристалічну ґратку мають Р, К, Na, Li, Tib, Zrb, Та, W, V, Fea, Cr, Nb, Ba та інші метали.

У гранецентрованій кубічній ґратці атоми розташовані у вершинах куба і в центрі кожної грані (рис. 1.2, б). Кристалічну ґратку такого типу мають: Ca, Се, Sr, Th, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Ir, Fe γ , Cu та інші метали.

Гексагональну ґратку щільного пакування мають Mg, Tia, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Со, Ве, Са та інші метали. Атоми у ГЦП-ґратці розташовані у вершинах і центрі шестигранних основ призми та три атоми – у середній площині призми (рис. 1.2, в).

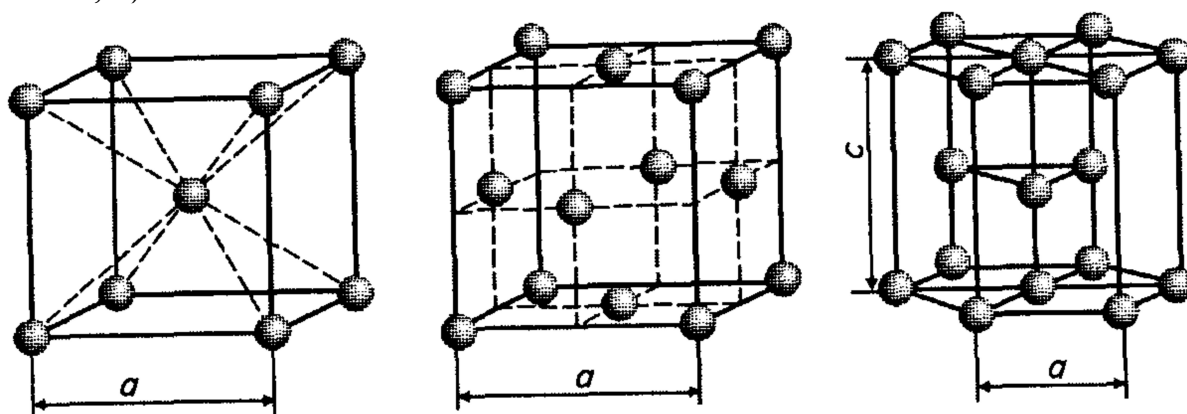


Рисунок 1.2 Елементарні кристалічні ґратки металів [1]: а – об'ємноцентрована кубічна (ОЦК); б – гранецентрована кубічна (ГЦК); в – гексагональна щільного пакування (ГЦП)

Алотронія металів

Поліморфним перетворенням називається зміна кристалічної будови залежно від температури і тиску. Перехід до нового типу кристалічної ґратки супроводжується зменшенням вільної енергії кристалів, що утворюються, порівняно з вихідними кристалами. Велике практичне значення має температурний поліморфізм, тобто наявність у металі різної кристалічної будови в інтервалі певних температур. На кривих охолодження поліморфному перетворенню відповідає горизонтальний відрізок сталої температури, завдяки виділенню прихованого тепла перекристалізації. Залежно від температури і тиску деякі метали можуть змінювати будову (тип) кристалічної ґратки, тобто існувати у різних кристалічних формах – поліморфних модифікаціях. Поліморфну модифікацію, стійку при найнижчій температурі, позначають літерою α , при більш високій – β , далі – γ тощо. Перехід від однієї модифікації до іншої називають **поліморфним перетворенням**. Кожна з модифікацій має свій температурний інтервал існування. За умов рівноваги поліморфне перетворення відбувається при постійній температурі і супроводжується виділенням тепла, якщо перетворення йде при охолодженні, або поглинанням тепла – в разі нагрівання. Для реалізації поліморфного перетворення, як і при кристалізації з рідкої фази, потрібне деяке переохолодження (або перегрів) відносно рівноважної температури. Зміна типу кристалічної будови у твердому стані відбувається шляхом зародження центрів нових кристалів і подальшого їх росту. Такий процес іноді називають вторинною кристалізацією на відміну від кристалізації первинної, що відбувається у рідині. Під час вторинної кристалізації зародки нових кристалів найчастіше виникають на границях зерен

старих кристалів. У процесі росту нових кристалів протягом певного часу зберігається когерентний зв'язок між новою і старою ґратками в площині, де атоми обох ґраток є спільними. Характерною особливістю вторинної кристалізації є можливість досягти дуже великого переохолодження, внаслідок чого вдається практично зупинити перебудову ґратки завдяки зниженню швидкості самодифузії атомів, необхідної для росту нових кристалів. Збільшуючи переохолодження до граничного значення, можна закріпити термодинамічно нестійкий високотемпературний стан і зберегти його протягом тривалого часу при кімнатній температурі. Поліморфні перетворення супроводжуються стрибкоподібною зміною властивостей металу. Ці перетворення лежать в основі зміцнюючих і знеміцнюючих термообробок.

Різновидом поліморфізму є **алотропія** тобто здатність одного елемента існувати у вигляді різних простих речовин. Прикладом алотропічного перетворення є перебудова кристалічної ґратки графіту в кристалічну ґратку алмазу при надвисокому тиску і підвищеній температурі.

Відомі поліморфні перетворення для таких металів: $Fe_{\alpha} \leftrightarrow Fe_{\gamma} \leftrightarrow Fe_{\delta}$; $Ti_{\alpha} \leftrightarrow Ti_{\beta}$; $Mn_{\alpha} \leftrightarrow Mn_{\beta} \leftrightarrow Mn_{\gamma} \leftrightarrow Mn_{\delta}$; $Sn_{\alpha} \leftrightarrow Sn_{\delta}$, Ca, Li, Te, Na, Cs, Sr, Zn, РЗМ – металів тощо.

Внаслідок поліморфного перетворення утворюються нові кристалічні зерна іншої форми та розміру. Тому таке перетворення називають **перекристалізацією**. При цьому властивості металів і сплавів змінюються стрибкоподібно.

Розглянемо закономірності фазових перетворень і формування структури чистого заліза. При охолодженні розплаву чистого заліза перша температурна зупинка на графіку охолодження (рис. 1.3) спостерігається при температурі 1539 °С, коли залізо з рідкого стану переходить у твердий. В результаті кристалізації утворюється δ -залізо з кристалічною ґраткою об'ємноцентрованої куба (ОЦК) з параметром $a = 2,93 \text{ \AA}$. При температурі 1400 °С ця форма заліза переходить в γ -залізо і змінює кристалічну ґратку на кубічну гранецентровану (ГЦК) з параметром $a = 3,64 \text{ \AA}$. При подальшому зниженні температури до 911 °С γ -залізо переходить у β -залізо з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою і параметром $a = 2,90 \text{ \AA}$. Подальше охолодження до 768 °С призводить до перетворення немагнітного β -заліза у магнітне α -залізо з ОЦК-ґраткою і параметром $a = 2,86 \text{ \AA}$. Наявність кількох алотропічних модифікацій заліза залежно від температури позначається на процесах формування структури і властивостей залізовуглецевих сплавів.

Елементарна ґратка – це найменша кількість атомів, яка при багаторазовому повторенні у просторі дозволяє побудувати просторову кристалічну ґратку певної системи.

Відрізки дорівнюють відстанням до найближчих атомів (іонів) за координатними осями у тривимірному просторі, позначають їх літерами a , b , c .

Кути між цими відрізками позначають α , β , γ . Співвідношення відрізків і кутів визначає форму ґратки.

Період або параметр ґратки дорівнює довжині ребра ґратки у напрямі головних осей кристалічної ґратки. Параметри ґратки вимірюють у нанометрах (нм), ангстремах (Å). Координаційне число (K) характеризує щільність

пакування гратки, визначає кількість найближчих і рівновіддалених атомів у певній кристалічній гратці.

Координаційне число простої кубічної гратки позначають К6 (літера вказує на тип гратки, цифра - на кількість атомів), об'ємноцентрованої кубічної – К8; гранецентрованої кубічної – К12; гексагональної – Г6; гексагональної щільного пакування – Г12.

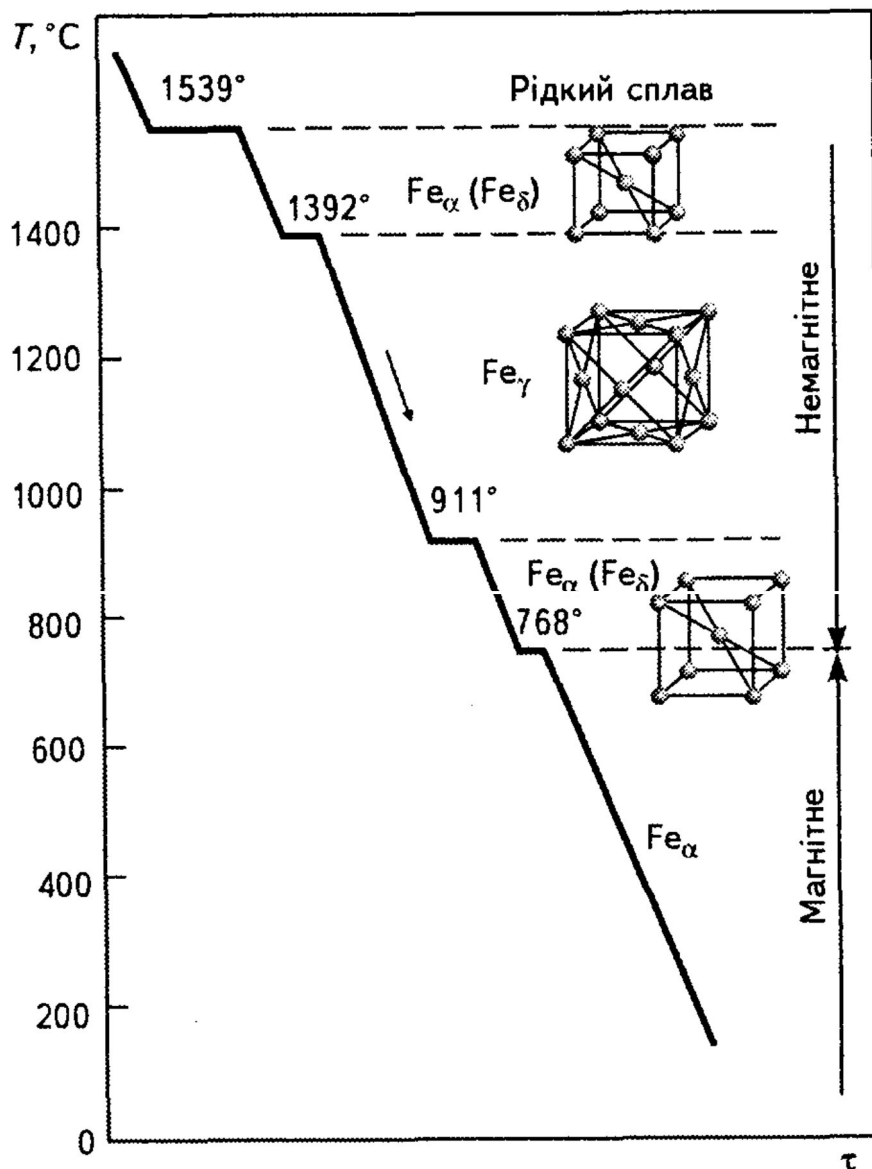


Рисунок 1.3 Крива охолодження чистого заліза

Базис – це кількість атомів (іонів), що належать до однієї гратки.

Атомний радіус – половина відстані між центрами найближчих атомів у кристалічній гратці певної кристалічної системи.

Коефіцієнт компактності – це відношення об'єму, що займають атоми (іони), до всього об'єму гратки даного типу. Для характеристики просторової орієнтації кристалічної гратки використовують також індекси площин та напрямків (рис.1.4). Площини позначають цифрами у круглих дужках, наприклад (100). Сукупності аналогічних площин позначають цифрами у фігурних дужках, наприклад {100}. При позначенні напрямків використовують прямокутні дужки, наприклад [100].

ТЕМА № 2 Будова металів. Ізотропія, анізотропія в кристалах і металах

Із спостережень за розташуванням атомів у різних площинах кристалічної ґратки видно, що насиченість цих площин атомами неоднакова. Також різні й відстані між атомами та сили міжатомного зв'язку. Так, в ОЦК-ґратці площині (100) належить лише один атом $[(1/4) \times 4]$, площині (110) два: один вносять атоми, що знаходяться у вершинах $[(1/4) \times 4]$, і один – атом у центрі куба. У ГЦК-ґратці найщільніше атоми розташовуються у площині (111), а в ОЦК-ґратці – у площині (110). Це зумовлює різний рівень фізико-механічних властивостей окремих кристалів (монокристалів) у різних площинах і напрямках кристалічної ґратки – так звану **анізотропію**.

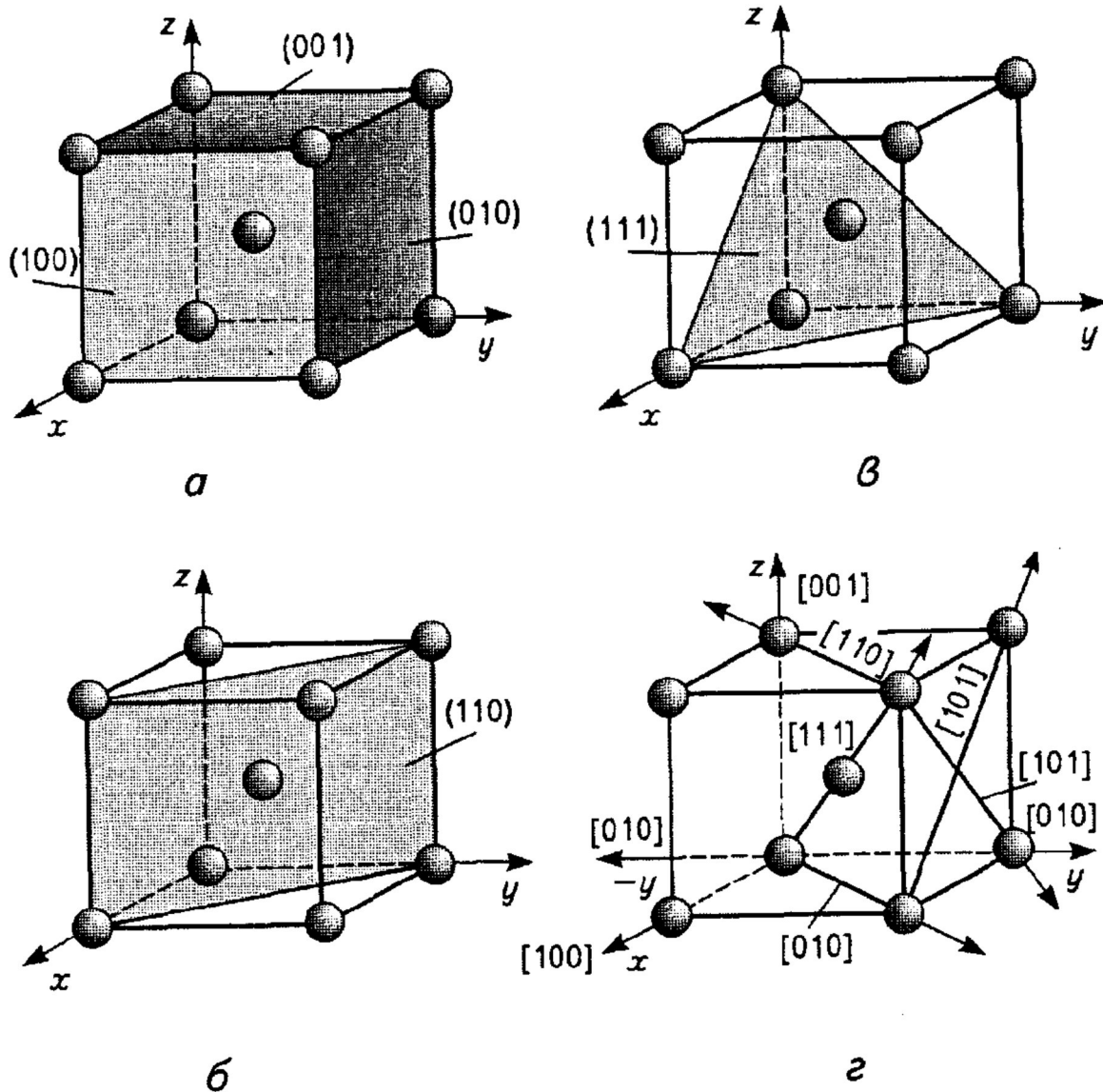


Рисунок 2.1 Індеси кристалографічних площин (а - в) і напрямків (г) в об'ємноцентрованій кубічній ґратці (ОЦК)

Це характерна особливість кристалічного тіла на відміну від аморфних з неупорядкованою насиченістю атомами у різних напрямках, тобто ізотропних. У різних кристалографічних площинах, проведених через центри атомів у кристалічних решітках, число атомів і відстані між ними неоднакові. У зв'язку з цим властивості монокристалів у різних напрямках неоднакові. Таке явище

називається анізотропією. Анізотропія виявляється в неоднаковості опорів монокристала електричному струму і швидкості розчинення в хімічних реактивах, у відмінності механічних властивостей. Наприклад, міцність зразків, вирізаних у різних напрямках з монокристала міді, відрізняється приблизно в 3 рази, а пластичність – більше ніж у 5 разів. Реальні технічні метали є полікристалами, тобто складаються зі значної кількості по-різному орієнтованих у просторі анізотропних кристалів (зерен). Тому властивості таких полікристалів у всіх напрямках усереднюються і практично не відрізняються. Проте такі технологічні операції, як кування, прокатування, штампування, можуть створювати певну переважаючу орієнтацію зерен і призвести до анізотропії полікристалічного металу.

Так, міцність зразків, вирізаних з листа вздовж і впоперек напрямку прокатування, різна, температурний коефіцієнт лінійного розширення листа з цинку залежно від напрямку прокатування може відрізнятися в 1,5...2 рази.

Ізотропія – це явище протилежне анізотропії.

Будова реального металу. Загальні поняття про дефекти кристалічної будови кристалів та їх вплив на властивості металів

Реальні полікристалічні метали завжди мають дефекти (недосконалості) кристалічної будови. Характер і ступінь порушення досконалості кристалічної будови значною мірою визначають властивості металів. Дефекти будови кристалічної ґратки за геометричними ознаками поділяють на: точкові (нульвимірні); лінійні (одновимірні); поверхневі (двовимірні); об'ємні дефекти.

До **точкових дефектів** (невеликі розміри у трьох вимірах) належать вакансії, міжвузлові та домішкові атоми.

Вакансія – це вузли кристалічної ґратки, в яких атоми відсутні (рис. 2.2, б). На вільне місце у ґратці може переміщуватись інший атом, залишаючи нове вакантне місце. Це сприяє дифузії та самодифузії металу. Кількість вакансій за кімнатної температури порівняно із загальною кількістю атомів незначна (приблизно одна вакансія на 10^{18} атомів), але дуже зростає при підвищенні температури. Так, при температурі, що майже дорівнює температурі плавлення, одна вакансія припадає вже на 10^4 атомів металу.

Міжвузлові атоми – це атоми, що вийшли з вузла кристалічної ґратки і зайняли місце у міжвузлях (див. рис. 2.2, а).

Домішкові атоми – це атоми іншого елемента, які розташовуються у вузлах або міжвузлях кристалічної ґратки металу (сплаву).

Точковий дефект розглядають як центр стиснення або розширення у пружному середовищі, що зумовлює викривлення біля нього кристалічної ґратки (рис. 2.3). Точкові дефекти можуть взаємодіяти між собою, утворюючи пари або комплекси різних дефектів. До **лінійних дефектів** належать такі, що мають невеликі розміри у двох вимірах і значну протяжність у третьому. Це може бути низка вакансій або міжвузлових атомів. Особливим і найважливішим видом лінійної недосконалості є **крайові і гвинтові дислокації** (рис. 2.4).

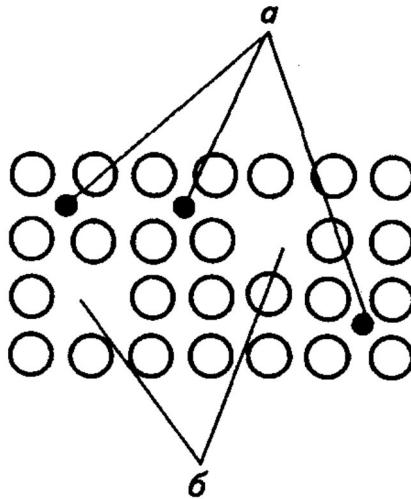


Рисунок 2.2 Точкові дефекти у кристалічній ґратці: а – міжвузлові атоми; б – вакансії

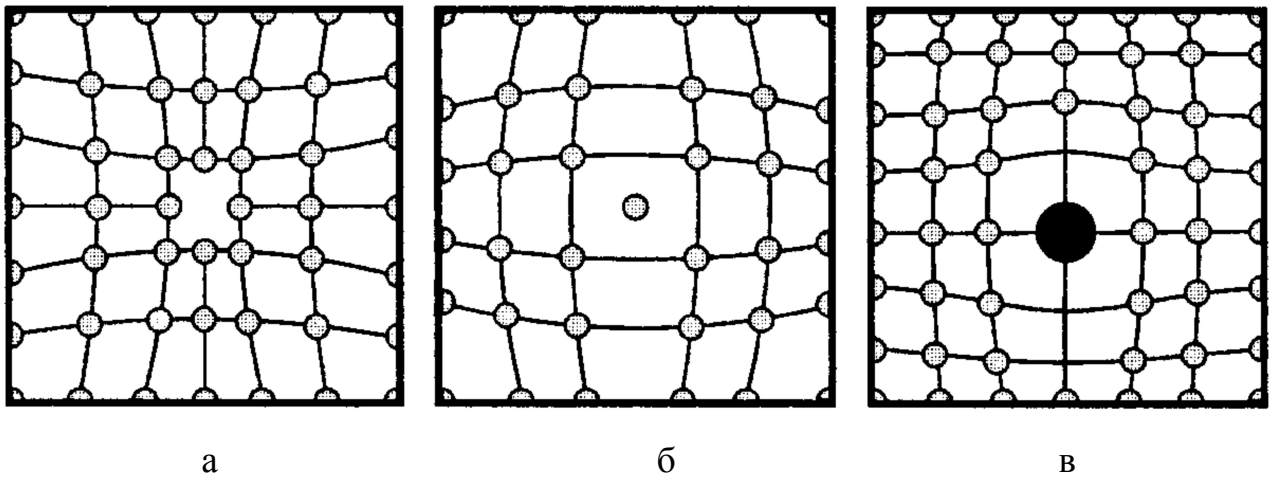


Рисунок 2.3 Викривлення кристалічної ґратки біля вакансії (а), дислокованого (б) і домішкового (в) атомів

Крайова дислокація – це локалізоване викривлення кристалічної ґратки внаслідок присутності в ній "зайвої" напівплощини (екстраплощини). Край цієї площини утворює дефект ґратки – лінійну (крайову) дислокацію, біля якої виникають пружні викривлення ґратки і відбувається зміщення атомів відносно їх нормальних положень при невеликому дотичному напруженні. У цьому випадку екстраплощина шляхом незначного зміщення перейде у повну площину кристалу, а функції екстраплощини будуть передані сусідній площині. Якщо екстраплощина знаходиться у верхній частині кристала, то дислокацію називають *позитивною* і позначають \perp , а якщо у нижній – то *негативною* і позначають \top . Ця відмінність між ними дуже умовна і якщо перевертати кристал, то позитивна дислокація змінюється на негативну і навпаки. Дислокації однакового знаку відштовхуються, а різного – притягуються. Зближення дислокацій з різним знаком призводить до їхнього взаємознищення. Порушення порядку розташування атомів може призвести до утворення іншого виду дефекту – гвинтової дислокації (див. рис. 2.4, б). У цьому випадку кристал можна уявити як такий, що складається з однієї атомної площини, закрученої у вигляді гвинтової поверхні.

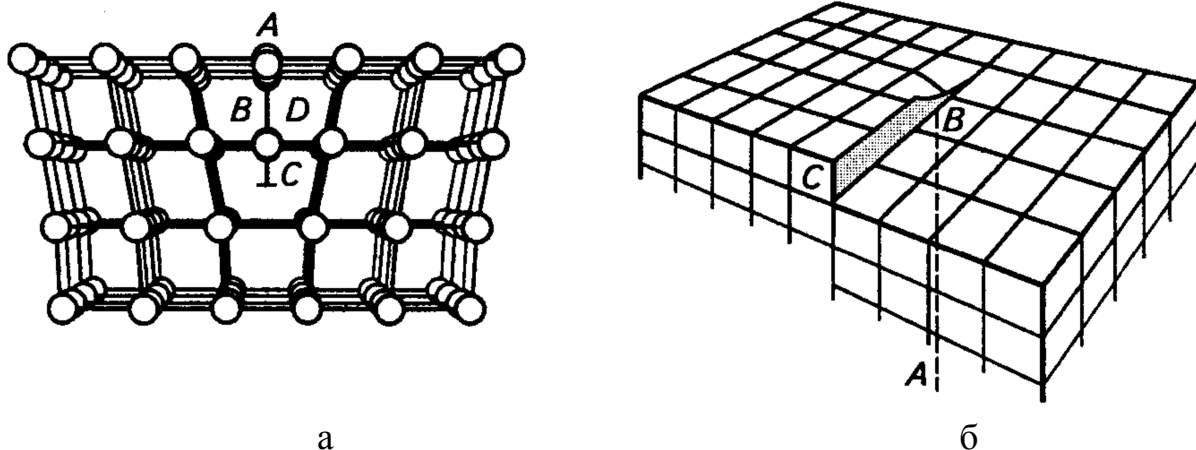


Рисунок 2.4 Схеми кр айової (а) та гвинтової (б) дислокацій у кристалічній ґратці металу

На відміну від крайової гвинтова дислокація паралельна до вектора зсуву. Розрізняють: правосторонні (за рухом годинникової стрілки) і лівосторонні (проти руху стрілки годинника) гвинтові дислокації. Нагадаємо, що навколо дислокації утворюється зона викривлення кристалічної ґратки. Енергію викривлення ґратки характеризує так званий вектор Бюргерса, з величиною якого пов'язують здатність дислокації до переміщення. Важливе значення має характеристика кількості дислокацій – *густина дислокацій*. Це сумарна довжина дислокацій (ΣL), що виражається у сантиметрах на одиницю об'єму (V , см^3), тобто $\rho = L/V$, см^{-2} . У реальних кристалах металів вона становить $\sim 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ дислокацій. Рухливість їх висока і вони здатні до розмноження під дією зовнішніх зусиль, прикладених до металу. За значної пластичної деформації густина дислокацій зростає до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Густина дислокацій та їх розташування значною мірою впливають на властивості металів. Реальний металевий кристал містить не лише атомно-кристалічні дефекти (вакансії, дислокації), а й структурні недосконалості (блоки, фрагменти, субзерна).

Поверхневі дефекти незначні за розмірами лише в одному вимірюванні – це поверхні розділу між окремими зернами або субзернами у – полікристалічному металі (рис. 2.5). Полікристал складається з великої кількості зерен, кристалічні ґратки яких розорієнтовані (за кристалографічними напрямками) на кути до кількох десятків градусів. Тому границі між зернами називають великокутовими. Кожне зерно складається з окремих фрагментів субзерен, розорієнтованих один від одного на один або кілька градусів. Границі між ними називають малокутовими. Субзерна у свою чергу складаються немовби з мозаїки окремих блоків розміром $1000 \dots 100\,000 \text{ \AA}$, кристалографічні площини яких розорієнтовані на невеликий кут – менше 1° . Така триступінчаста структура не є обов'язковою. Зерна можуть складатись також з фрагментів без внутрішньої блочної структури або лише з блоків. Границі зерен являють собою перехідну зону завширшки до $3 \dots 4$ міжатомних відстаней, у якій ґратка одного кристала переходить у ґратку іншого, що має іншу кристалічну орієнтацію. Границі зерен і блоків мають порушення закономірності розташування атомів, скупчення дислокацій та домішкових атомів, мають підвищену хімічну активність.

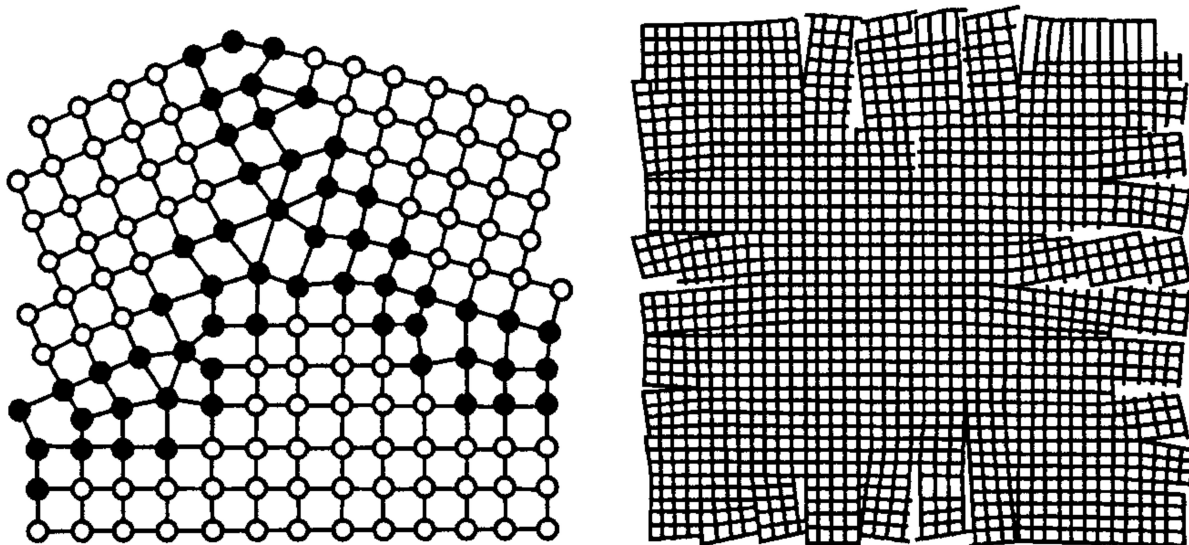


Рисунок 2.5 Схеми різної орієнтації у полікристалічному металі (а) та субзеренної (блочної) структури металу (б)

До **об'ємних дефектів** належать скупчення точкових дефектів, що утворюють пори, а також вкраплення іншої фази. Дислокації легко переміщуються у напрямку, перпендикулярному екстраплощині. Чим легше переміщуються дислокації, тим нижче міцність матеріалу, тим легше йде пластична деформація. Таким чином, причиною низької міцності реальних металів є наявність у структурі матеріалу дислокацій та інших дефектів будови. Отримання бездислокаційних кристалів призводить до різкого підвищення опору пластичної деформації, тобто до підвищення міцності матеріалів. Вплив дефектів кристалічних ґраток на міцність металів наведено на рис. 2.6. Ліва гілка кривої відповідає створенню досконалих бездислокаційних ниткоподібних кристалів (так званих «вусів»), міцність яких близька до теоретичної. При обмеженій густині дислокацій та інших дефектах кристалічних ґраток процес зсуву відбувається тим легше, чим більше дислокацій знаходиться в об'ємі металу.

Із зростанням напруг зростає кількість джерел дислокацій у металі, і їх густина збільшується. Крім паралельних дислокацій, виникають дислокації в різних площинах і напрямках. Дислокації впливають одна на одну, заважають переміщенню, відбувається їх анігіляція (взаємне знищення). З підвищенням густини дислокацій їх рух стає все більш утрудненим, що вимагає збільшення прикладеного навантаження для продовження деформації. У результаті метал зміцнюється, що відповідає правій гілці кривої рис. 2.6. Зміцненню сприяють й інші дефекти кристалічної будови, які також гальмують рух дислокацій. До них належать атоми розчинених в металі домішок і легуючих елементів, частинки виділень другої фази, границі зерен або блоків тощо.

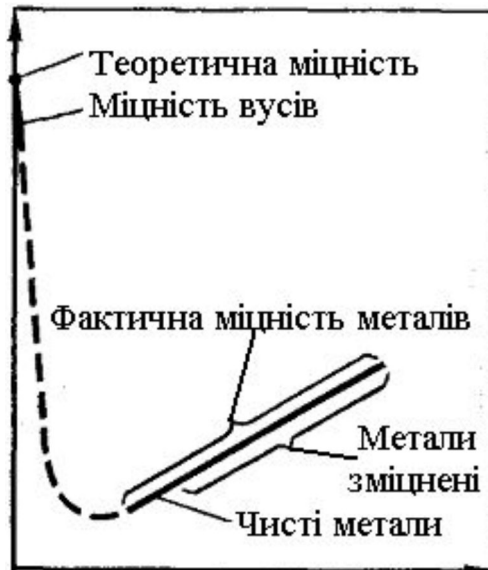


Рисунок 2.6 Вплив дефектів кристалічних ґраток на міцність кристала

На практиці перешкода руху дислокацій, тобто зміцнення, створюється введенням інших елементів (легуванням), наклепом, термічною або термомеханічною обробкою. Зниження температури також перешкоджає вільному переміщенню дислокацій. При низьких температурах міцність росте, а пластичність падає. Метал стає більш міцним, але крихким. Таким чином, підвищення міцності металів і сплавів може бути досягнуте двома шляхами: 1) отриманням металів з більш близькою до ідеальної будовою кристалічних ґраток, тобто металів, в яких відсутні дефекти кристалічної будови або ж їх число вкрай мале; 2) або, навпаки, збільшенням кількості дефектів (структурної недосконалості), що перешкоджають руху дислокацій.

ТЕМА №3 Кристалізація металів. Термодинамічні основи фазових перетворень металів

Перехід металу з рідкого стану в твердий з утворенням певного типу кристалічної ґратки та виникненням кристалів називається **кристалізацією**. Процес кристалізації набуває розвитку за умов, коли вільна енергія твердого металу стає меншою за вільну енергію рідкого, тобто коли система переходить у більш стійкий за даних умов стан. Вільна енергія – це та частина внутрішньої енергії, яка може бути перетворена в роботу. Під час підвищення температури вільна енергія рідкого та твердого станів зменшуються. Зміна вільної енергії металу у рідкому та твердому станах залежно від температури показана на рис. 3.1. Вільні енергії рідкого й твердого станів з підвищенням температури зменшуються. При досягненні теоретичної температури кристалізації (T_s) вільні енергії рідкого та твердого металу стають однаковими. Кристалізація можлива лише тоді, коли рідкий метал охолодити нижче T_s до так званої *фактичної температури кристалізації* (T_k). Різницю температур $\Delta T = T_s - T_k$ називають *ступенем переохолодження*. Отже, кристалізація може відбуватися лише за умови переохолодження розплаву нижче рівноважної температури T_s . Процес кристалізації можна відобразити графічно в координатах температура – час за допомогою так званих кривих охолодження (рис. 3.2). Спочатку температура металу (у рідкому стані) знижується рівномірно до температури кристалізації T_k , яка знаходиться нижче T_s . При досягненні фактичної T_k на кривій охолодження з'являється горизонтальна ділянка, оскільки тепловідбір в оточуюче середовище компенсує виділення прихованої теплоти кристалізації. Після завершення кристалізації температура знову рівномірно знижується.

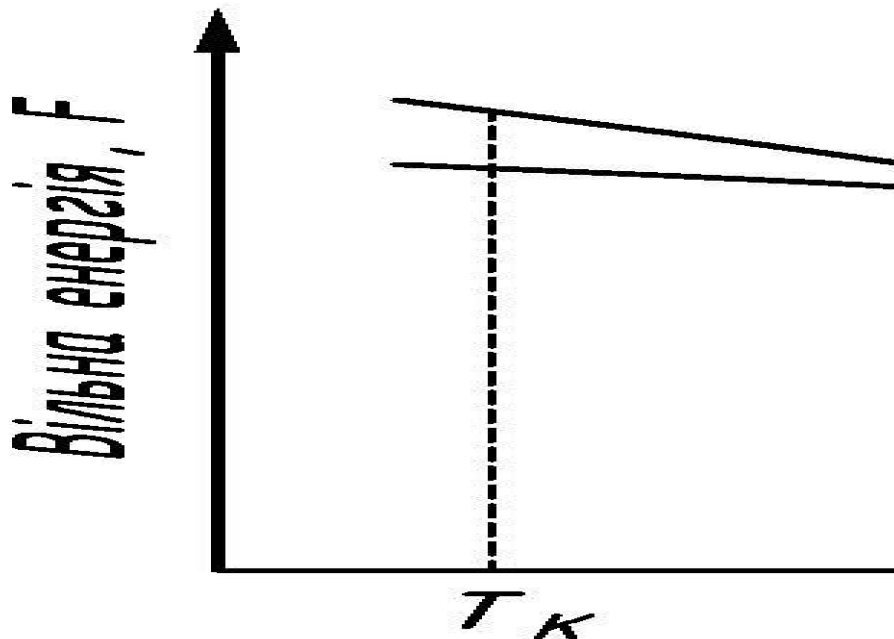


Рисунок 3.1 Зміна вільної енергії металу у рідкому (1) і твердому (2) станах залежно від температури

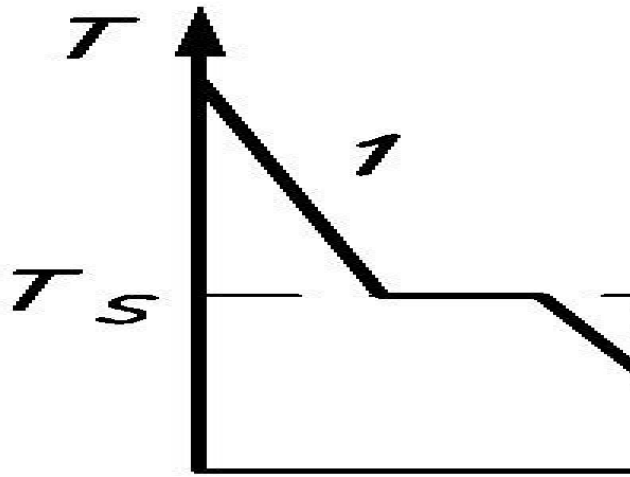


Рисунок 3.2 Криві охолодження при кристалізації:
 1 – теоретичний процес; 2 – реальний процес; 3 – за умов
 значного переохолодження

Чим вища швидкість охолодження, тим більший ступінь переохолодження, а отже нижча температура, за якої відбувається кристалізація. Відповідно до рис. 3.1 процес кристалізації (теоретичний) зображує крива 1, а реальний – крива 2. Розплав безперервно охолоджується до *температури переохолодження* T_p , яка розміщується нижче температури кристалізації T_k . Охолодження нижче T_s створює енергетичні умови для протікання процесу кристалізації. Нагадаємо, що у рідкому металі упорядковане розташування атомів розповсюджується лише на невелику відстань і охоплює невелику кількість атомів. Тобто, на відміну від твердого стану з дальнім порядком розташування атомів, зберігається так званий ближній порядок. Такі мікрооб'єми з регулярним розміщенням атомів можуть виникати, існувати деякий час, зникати і утворюватися вже в іншому елементарному об'ємі розплаву. Зі зниженням температури ступінь утворення мікрооб'ємів ближнього порядку, їх розмір і стабільність зростають. За температур, близьких до температури плавлення, стає можливим утворення невеликих угруповань, в яких атоми розташовані так само, як і в кристалах. У чистому від домішок розплаві такі найбільш стабільні великі угруповання перетворюються в зародки (центри кристалізації). Такий механізм утворення зародків називають *гомогенним*. Частіше осередком утворення зародків у розплавах реальних металів слугують найрізноманітніші тверді частки (оксиди, неметалеві вкраплення тощо), які завжди присутні в розплаві. Переохолодження чистих металів – $200\text{ }^\circ\text{C}$ (наприклад, золота), а реальних промислових металів та сплавів – $10\text{...}20\text{ }^\circ\text{C}$. У випадках, коли такі частки мають однакову будову кристалічної ґратки з ґраткою тверднучого металу (ізоморфні домішки) і параметри спряжених ґраток домішки та металу приблизно однакові (різниця не перевищує 9 %), вони виконують роль центрів кристалізації. Таке утворення зародків називають *гетерогенним*.

Процес кристалізації складається з двох елементарних процесів: утворення зародків (центрів кристалізації) та росту кристалів з цих центрів. Ці процеси мають власні швидкості, які й визначають параметри кристалізації. Перший з

параметрів – це *швидкість утворення зародків* (C), яка визначається кількістю зародків, які утворюються в одиниці об'єму за одиницю часу (вимірюється у $1/(\text{см}^3 \times \text{с})$). Другий – це *лінійна швидкість росту кристалів* (n). Вона характеризує зміну лінійних розмірів кристалів і вимірюється в сантиметрах на секунду ($\text{см}/\text{с}$). Від співвідношення цих параметрів залежать розміри зерен у полікристалічних металах. За теорією Таммана, кількість зерен (N) пропорційна швидкості утворення центрів кристалізації та обернено пропорційна швидкості росту зерна, тобто

$$N = K_n \times C / n, \quad (3.1),$$

де K_n – сталий коефіцієнт.

Темп зростання кількості зародків у більшості випадків переважає темп зростання лінійної швидкості їх росту. Зі зростанням ступеня переохладження величини параметрів кристалізації збільшуються. Мінімальний розмір зародка (R_k), здатного до зростання за певних температурних умов, називають *критичним розміром зародка*, а самзародок – *критичним* або *рівноважним*. Зі збільшенням ступеня переохладження або зі зниженням температури кристалізації розмір критичного зародка і відповідно розмір зерна зменшуються. У разі гетерогенного утворення центрів кристалізації подрібнення зерна зумовлюється кількістю домішок у металі. Розмір зерна певною мірою впливає на механічні та інші властивості металів. Кристалізація металів починається з формування центрів (зародків) кристалізації. Саме з них ростуть потім первинні, або головні, осі наступних кристалів. Слідом за головними і перпендикулярно до них ростуть осі вищих порядків (рис. 3.3, а). Такі первинні кристали, які нагадують зовнішнім виглядом дерево, називаються дендритами.

Подальший ріст дендритів і формування повнотілих кристалів відбувається за рахунок рідкого металу, що заповнює міжосьовий об'єм. Зростаючи, кристали ніби просуваються назустріч один одному, у певний момент стикаються між собою, перешкоджаючи росту кожного, внаслідок чого набувають випадкової зовнішньої форми (рис. 3.4). Такі кристали називаються зернами.

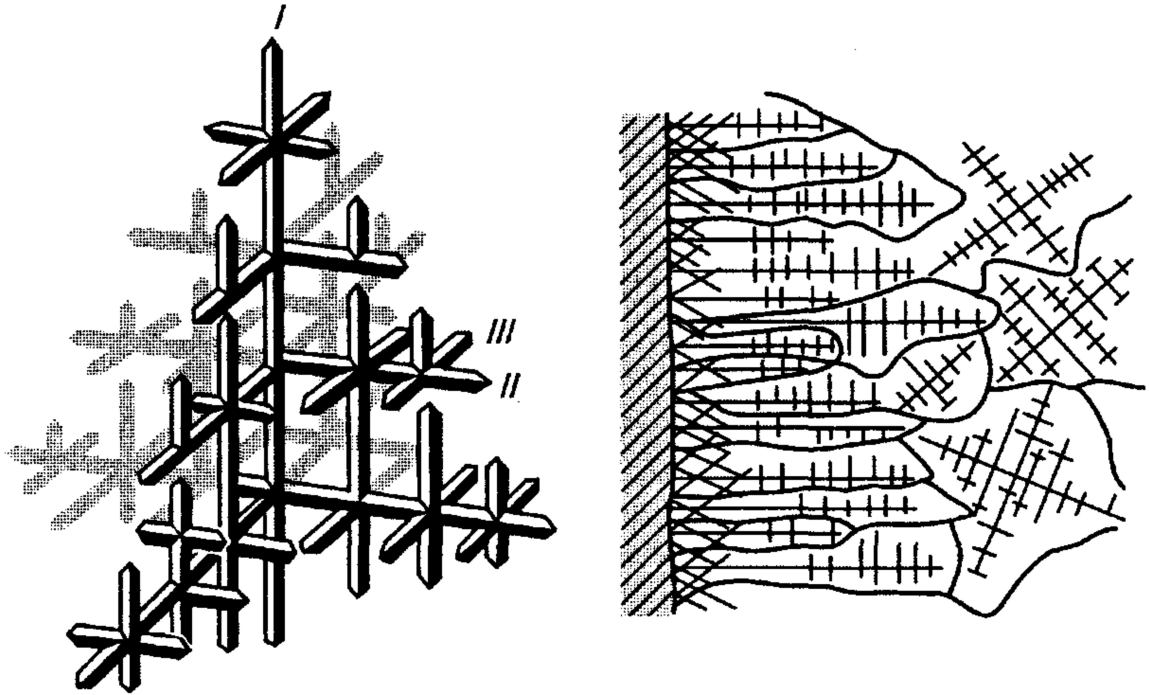


Рисунок 3.3 Схема будови дендритного кристалу (а) та росту дендритів за перерізом зливка (б): I–III – порядок осей дендритів

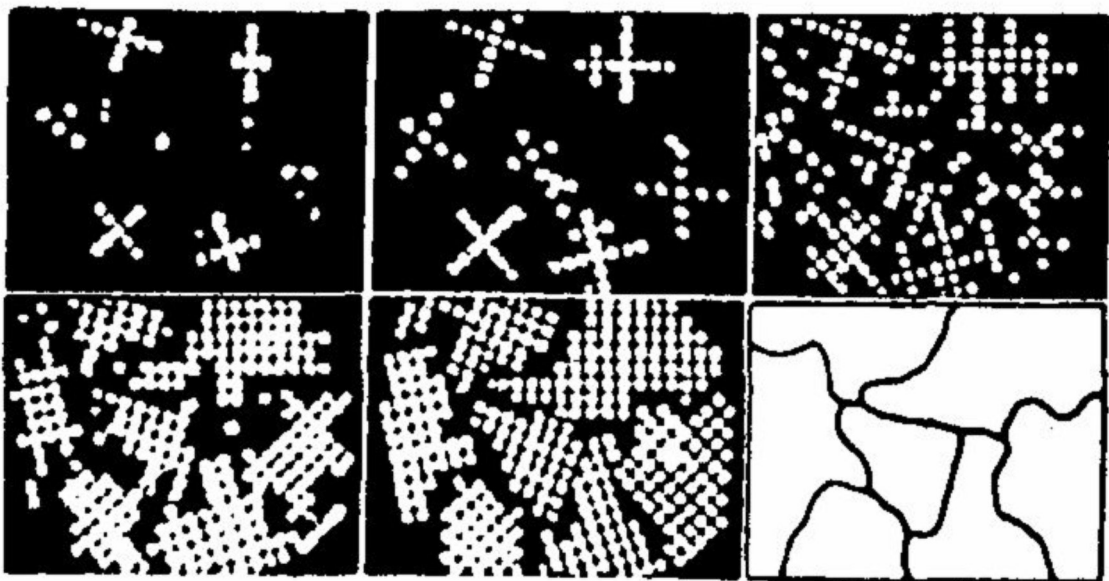


Рисунок 3.4 Схема формування зерен при кристалізації металу

Розміри і кількість зерен на кінець кристалізації залежать від швидкостей зародження і росту кристалів. Під швидкістю зародження розуміють кількість кристалів, які сформувалися в одиниці об'єму за одиницю часу, а під швидкістю росту – швидкість збільшення лінійних розмірів кристалу, що зростає. Швидкості зародження і росту кристалів залежать від ступеня переохолодження рідкого металу ΔT (швидкості охолодження). При невеликому ступені ΔT_1 (рис. 3.5) зароджується мало кристалів, проте ростуть вони з великою швидкістю і на кінець кристалізації досягають великих розмірів. Із збільшенням ступеня переохолодження до ΔT_2 і ΔT_3 кількість кристалів, що зароджуються за одиницю часу, зростає більше, ніж швидкість їх росту, тому розмір зерна в затверділому металі зменшується.

Дрібнозернистий метал має більш високі характеристики пластичності й в'язкості.

У ливарному виробництві для регулювання розмірів і форми зерен у певних випадках до рідкого металу спеціально вводять тугоплавкі дрібні частки, що слугують додатковими центрами кристалізації. Такі добавки називають модифікаторами, а сам процес – модифікуванням.

Будова металевого зливка

Реальні метали і сплави переходять у твердий стан (кристалізуються) з утворенням, за умов переохолодження і наявності домішок у розплаві, кристалів розгалуженої форми – дендритів (дендрит у перекладі з грецької (дендрон) – дерево) (див. рис. 3.3). Характерним для дендритної кристалізації є те, що зародки ростуть з нерівномірною швидкістю і переважно у напрямках інтенсивного тепловідводу, де швидкість росту максимальна. У цих напрямках формується вісь (або гілка) першого порядку – стовбур майбутнього дендритного кристалу. Внаслідок нерівномірної кристалізації зерен дендритної форми у різних місцях дендриту хімічний склад неоднаковий. Таку неоднорідність складу в межах одного дендритного кристалу називають *дендритною ліквіацією*.

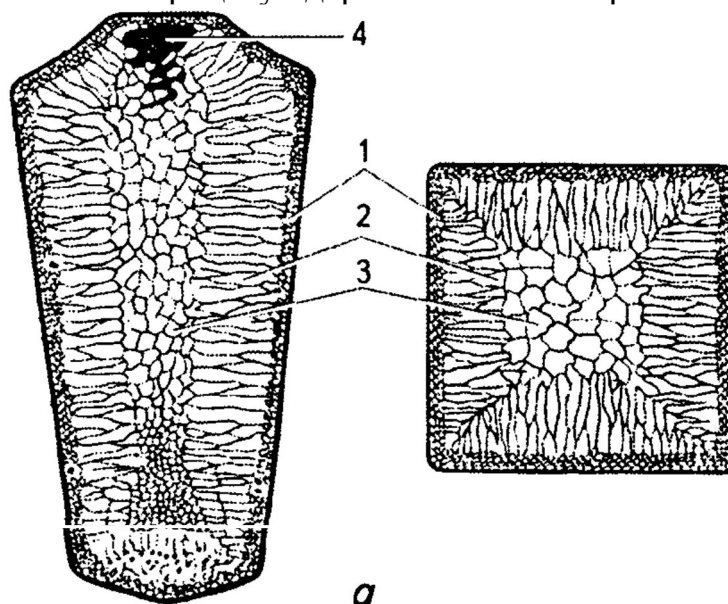
За виробничих умов при охолодженні великих мас металу у формах (виливницях) кристалізація не може відбуватися водночас по всьому об'єму зливка. Вона починається у зонах найбільшого відведення тепла (стінки і дно виливниці) і поширюється до середини форми. Різний ступінь переохолодження металу в об'ємі зливка, наявність домішок, температурно-часові параметри кристалізації та охолодження металу зумовлюють неоднорідність макроструктури, форми і розмірів зерен, хімічного складу, наявність макро- і мікронесуцільностей у металі зливка. Макроструктура сталевих зливок складається з трьох основних зон (рис. 3.5):

- дрібних рівноосних кристалів;
- великих орієнтованих (стовпчастих);
- рівноосних різно орієнтованих кристалів.

Зовнішня зона 1 розповсюджується на невелику глибину. Дрібні рівноосні кристали утворюються за умов значного переохолодження металу при контакті розплаву з холодними стінками виливниці. При цьому виникає значна кількість центрів кристалізації. Зона 2 утворена досить великими стовпчастими кристалами, що ростуть перпендикулярно стінкам і дну виливниці, тобто у напрямку, протилежному відведенню тепла від розплаву. Центральна зона 3 зливка складається з різних за розміром і орієнтацією рівноосних кристалів. Кристалізація зливка з утворенням різних структурних зон зумовлює наявність макроскопічної зональної ліквіації. Найбільше домішок скупчується у центральній та верхній частинах зливка. Слід відзначити також зменшення об'єму твердого металу порівняно з рідким (усадка). Це зумовлює утворення несцільностей у вигляді зосередженої раковини усадки, або зони дрібних раковин, порожнин, мікропор. Найбільш негативно на структуру і властивості металу впливає раковина усадки, поблизу якої сконцентрована найбільша кількість шкідливих домішок. Частина зливка, де знаходяться раковина усадки, усадкова пористість та ліквіаційна зона, є дефектною частиною (частиною

надливу). Тому при подальшій обробці тиском ця частина (15...25 %) видаляється і надходить на переплавлення. Дрібні несучільності, якщо їх стінки не окислились, усувають обробкою тиском (прокатування, кування тощо).

Структурні й хімічні неоднорідності литого металу певною мірою усувають при наступній термічній обробці. Для сталевих виливків найбільш розповсюджені два варіанти термічної обробки: нормалізація та нормалізація з наступним відпуском. Термічна обробка у більшості випадків є обов'язковою операцією технологічного процесу одержання литих виробів.



б

Рисунок 3.5 Будова (а) та мікроструктура (б) сталевого зливка: 1 – зона дрібних неорієнтованих кристалів біля стінки виливниці; 2 – зона стовпчастих, витягнутих до центра зливка, кристалів; 3 – зона рівноосних кристалів; 4 – раковина усадки

ТЕМА № 4 Поняття про механічні, фізичні, хімічні та технологічні властивості металів і сплавів

Метали характеризуються механічними, фізико-хімічними та технологічними властивостями.

Механічні властивості характеризують поведінку матеріалу під дією навантажень. Навантаження бувають статичні (є незмінні або зростають повільніше, ніж процеси в металі), динамічні (зростають з великою швидкістю) і циклічні (змінюються періодично, звичайно, за синусоїдним законом).

Механічні властивості визначають експериментально, дотримуючись стандартних методик. До механічних властивостей належать міцність, пластичність, твердість, ударна в'язкість, витривалість тощо.

Міцність – це здатність матеріалу чинити опір пластичній деформації і руйнуванню під дією навантажень.

Важливою характеристикою матеріалу є границя міцності, яку визначають у результаті руйнування зразків під час статичних випробовувань на спеціальних розривних машинах. Найчастіше випробовують на розтяг, рідше на стиск, згин або кручення.

Границею міцності матеріалу на розтяг σ_m називається відношення найбільшої сили F_{max} , яку витримує зразок перед руйнуванням, до початкової площі його поперечного перетину S_0 .

$$s_m = \frac{F_{max}}{S_0} = \frac{4F_{max}}{\rho d_0^2} \quad (4.1)$$

Пластичністю називається здатність металу пластично деформуватися. Вона характеризується відносним видовженням і відносним звуженням.

Відносне видовження після розриву δ – це відношення залишкового видовження зразка після руйнування $\Delta l_{зал} = l_k - l_0$ до його початкової розрахункової довжини l_0 , виражене у відсотках:

$$d = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (4.2)$$

де l_k – кінцева розрахункова довжина зразка, виміряна після руйнування.

Відносним звуженням зразка після розриву у називають відношення зменшення площі поперечного перерізу $\Delta S = S_0 - S_k$ зразка після руйнування до початкової площі поперечного перерізу зразка S_0 , виражене у відсотках:

$$y = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \times 100\% \quad (4.3)$$

де S_k – кінцева розрахункова площа поперечного перерізу зразка, виміряна після руйнування.

Відносне звуження точніше відображає пластичні властивості металу, ніж відносне видовження.

Твердість – це здатність металу чинити опір проникненню в нього іншого твердшого тіла, яке пластично не деформується.

Ударна в'язкість. В умовах експлуатації часто виникають ударні навантаження. Для оцінки опору матеріалу динамічним силам проводять випробовування на удар. Одним із видів таких випробувань є ударний згин, за

допомогою якого виявляють схильність матеріалів, зокрема конструкційних сталей, до крихкого руйнування внаслідок зниження температури, наявності надрізів, шкідливих домішок, зміни структурного стану, збільшення швидкості деформації та інших факторів. Під час ударного згину визначають таку механічну характеристику металу як ударна в'язкість. *Ударною в'язкістю* КС називається відношення роботи удару А, яка витрачається на руйнування стандартного зразка, до початкової площі його поперечного перерізу S_0 у місці руйнування:

$$КС = A / S_0, \text{ МДж/м}^2 \quad (4.4)$$

Витривалість. Визначення границі витривалості. Здебільш деталі машин під час експлуатації навантажені циклічними (повторно змінними) силами. При цьому прикладене до деталі напруження змінюється протягом кожного циклу від заданих найменшого s_{\min} (рис. 4.1) до найбільшого s_{\max} значення. Якщо значення s_{\min} і s_{\max} рівні за величиною і протилежні за знаком, то цикл напружень симетричний і коефіцієнт асиметрії циклу $R_0 = -\sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$. В усіх інших випадках маємо справу з асиметричним циклом.

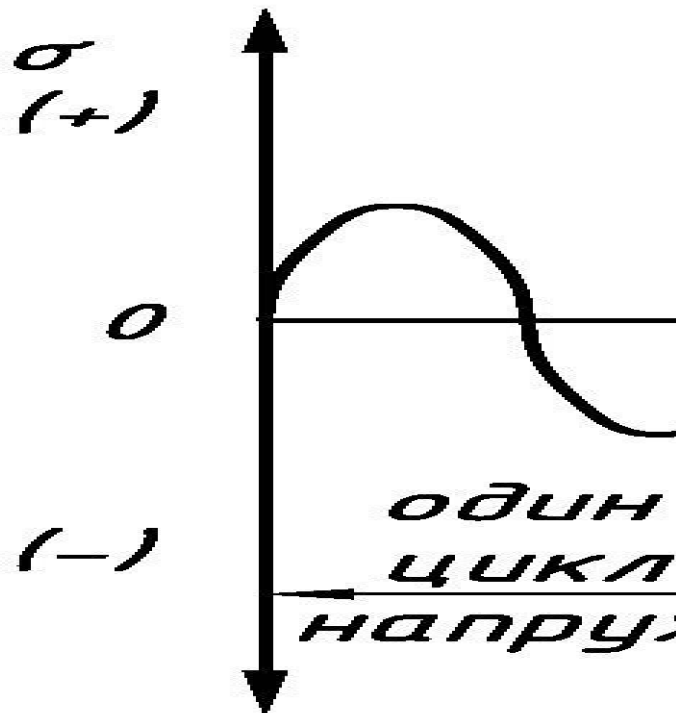


Рисунок 4.1 Зміна напружень s під час випробовування на втому [4]: t – час; σ_{\min} і σ_{\max} – відповідно мінімальне і максимальне значення напруження циклу

Нагромадження пошкоджень у металі під дією циклічних напружень є причиною втомного руйнування. Останнє поділяють на дві стадії - стадію зародження і стадію росту тріщини. *Витривалістю* називається здатність металу протистояти втому руйнуванню. На втому випробовують серію гладких переважно круглого перерізу зразків або зразків круглого перерізу з надрізом. Значно рідше застосовують зразки прямокутного перерізу. Один кінець зразка 1 (рис. 4.2) закріплюють у гнізді 2 вала машини, другий через підшипник 3 – навантажують зосередженою силою F . Під час експерименту

зразок обертається і сприймає знакозмінний симетричний згин. Кожен зразок випробовують при заданому найбільшому напруженні циклу s_{max} і фіксують кількість циклів N до руйнування. Якщо зразок при достатньо великій заданій базовій кількості циклів не зруйнувався, то його більше не випробовують. За результатами випробовувань будують графіки – криві втоми або криві Веллера – в координатах $\sigma - \lg N$ (рис. 4.3). Крива втоми відображає залежність між максимальними напруженнями циклу й довготривалістю (числом циклів до руйнування зразка).

Основний тип кривої втоми – графік з чітко вираженою горизонтальною ділянкою. Графіки такого типу притаманні чорним металам і титанові. Криві втоми з асимптотичним наближенням до осі абсцис властиві кольоровим металам.

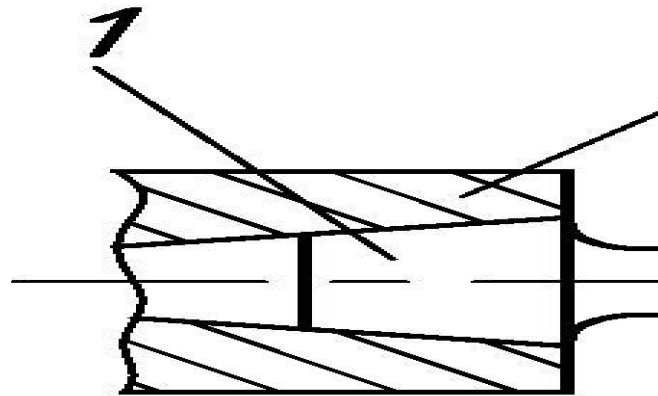


Рисунок 4.2 Схема випробовування на втому: 1 – зразок; 2 – гніздо вала машини; 3 – підшипник; F – сила

Границею витривалості (границею втоми) σ_w є таке найбільше напруження циклу, при якому матеріал не руйнується після як завгодно великої або заданої кількості циклів навантаження. Якщо коефіцієнт s асиметрії циклу $R_s = -1$, то границя витривалості позначається σ_{-1} . Практично границю витривалості визначають на базі нормованої кількості циклів навантаження. Для сталі база випробовування $N = 10^7$ циклів, у той час як для сплавів кольорових металів $N = 10^8$ циклів.

До **фізичних властивостей** належать густина, плавкість, теплове розширення, тепло- і електропровідність, магнітність тощо.

Хімічні властивості характеризують здатність металів чинити опір окисленню, розчинятися в хімічно активних середовищах (кислотах, лугах) і вступати у взаємодію з іншими елементами

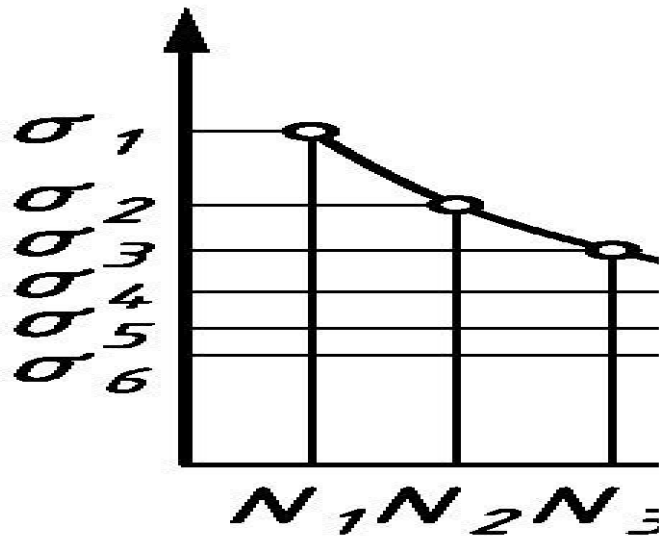


Рисунок 4.3 Крива втоми [4] в координатах $\sigma - \lg N$: σ – максимальне напруження циклу; N – кількість циклів напружень; s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 – максимальні напруження і N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 – відповідні їм кількості циклів, при яких були зруйновані зразки; σ_w – границя витривалості; N_6 – базова кількість циклів

Технологічні властивості характеризують можливість проводити ті чи інші технологічні операції з певним металом або застосовувати метал в тих чи інших умовах. До технологічних властивостей належать: прогартовуваність, рідкотекучість, ковкість, зварюваність, оброблюваність різанням.

ТЕМА № 5 Теорія сплавів. Методи побудови діаграми стану сплавів

Основні поняття: сплав, система, компонент, фаза

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

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 за незначних ступенів перегрівання чи переохолодження.

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

Фаза – це хімічно однорідна частина системи, відокремлена від інших частин (фаз) поверхнею розділу. 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 ґратки.

Кількість співіснуючих у сплаві фаз позначають літерою Ф. Структура і властивості сплавів значною мірою 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 розплаву, розрізняють дво-, три- або багатоконпонентні сплави (системи). У розплаві всі компоненти сплаву знаходяться в атомарному стані, утворюючи рідкий однорідний розчин із статистично однаковим хімічним складом.

Особливості кристалізації сплавів

Під час кристалізації атоми компонентів розташовуються у певному порядку, утворюючи кристалічну речовину – сплав. При цьому існує три типи взаємодії компонентів сплаву:

- утворення *механічної суміші* компонентів;
- утворення *хімічних сполук*;
- утворення *твердих розчинів*.

У разі формування *механічної суміші* компонентів сплаву атоми кожного з компонентів утворюють власні кристалічні ґратки, тобто кожний елемент кристалізується самостійно. Механічну суміш, яку утворюють два компоненти, що нездатні взаєморозчинятись або утворювати хімічну сполуку при

кристалізації з рідкого стану, називають евтектикою. Структура сплавів такого типу (Sn-Zn, Sb-Pb) неоднорідна (гетерогенна). Властивості таких сплавів будуть усередненими, виходячи з рівня властивостей компонентів та їхнього кількісного вмісту у сплаві.

Утворення хімічної сполуки при кристалізації зумовлено здатністю різнорідних атомів (які значною мірою 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 A_nB_m (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 (сингулярність). Якщо ж при переході сплаву з рідкого стану в твердий зберігається однорідність і розчинність елементів, що його утворюють, 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 й тверді розчини проникнення (рис. 5.1). Утворення відповідного виду твердого розчину пов'язане з типом кристалічної ґратки та співвідношенням атомних радіусів компонентів.

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 як на 8...15 %. Проте допустима різниця в параметрах для різних пар металів різна. Так, необмежені тверді розчини у сплавах на основі заліза можуть утворюватись за умови, що атомні діаметри елементів, які розчинюються, відрізняються від заліза не більше як на 8 %. Якщо різниця атомних діаметрів більше 8 %, на основі заліза 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 Д. Менделєєва тощо. Дійсно, метали, розташовані поблизу один від одного у таблиці Д. Менделєєва, мають необмежену розчинність: Cu і Ni; Fe і Ni; Fe і Cr; Fe і Co; Co і Ni, або розташовані в одній групі: As і Sb; Au і Ag; Au і Cu; Bi і Sb.

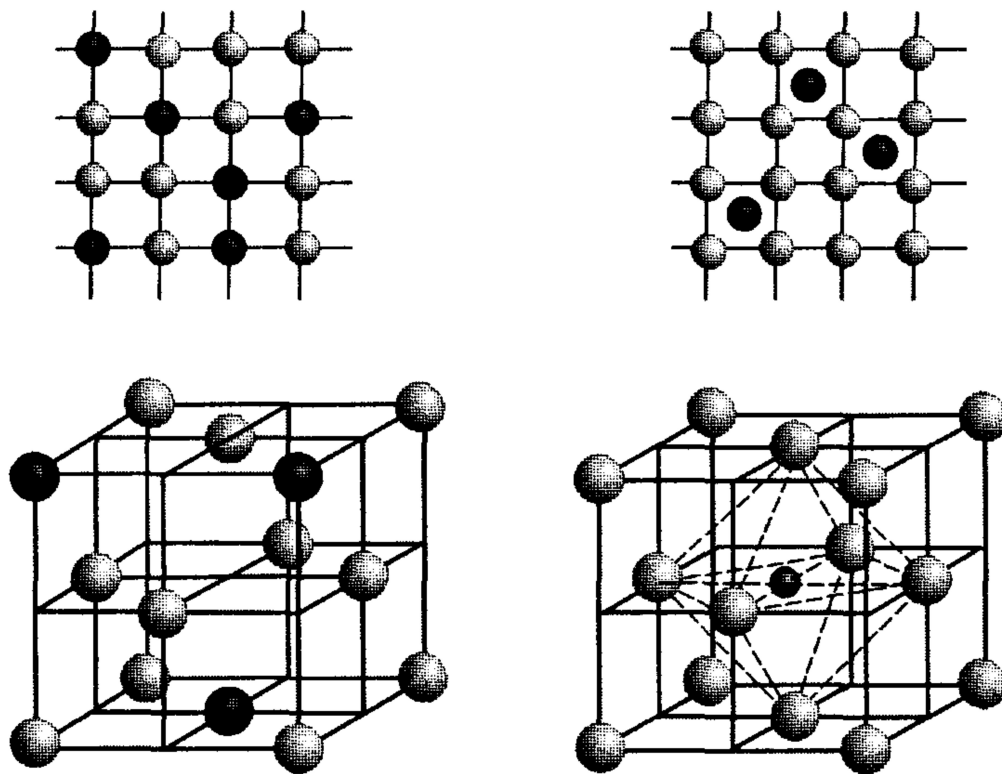


Рисунок 5.1 Схеми розташування атомів у твердих розчинах заміщення (а) та втілення (б)

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 елемента. Обмежена розчинність компонентів характерна також при утворенні ними *твердих розчинів проникнення*, тобто таких, коли атоми розчинених компонентів розташовуються (проникають) у міжвузлових об'ємах металу-розчинника. При цьому атоми розміщуються не в будь-якому міжвузлі, а лише в тих, 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 (заміщення, проникнення) супроводжується зміною параметрів кристалічної ґратки металу-розчинника залежно від співвідношення розмірів атомів компонентів і відповідним зміцненням сплаву. Зміцнення пропорційне відноській 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. Відзначимо також, що 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 а, б, γ тощо.

Діаграма стану сплаву (визначення, практичне значення)

Важливо знати стан і структуру сплавів залежно від зміни температури і концентрації компонентів, що їх утворюють. Такий зв'язок відображають *діаграми стану сплавів*, які 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 в стані металу або сплаву (фазові та структурні перетворення) супроводжуються певними тепловими ефектами. Так, під час плавлення твердих кристалічних тіл тепло *поглинається*, а при кристалізації воно *виділяється*.

Температури, при яких відбуваються зміни стану (перетворення) сплаву, називають *критичними*: $T_{пл}$ – температура плавлення; $T_{кр}$ – температура кристалізації тощо. Для побудови діаграм стану необхідно знати критичні температури сплаву. Визначають їх на основі аналізу швидкостей охолодження (нагрівання), графічно зображених у координатах "температура – час" (рис. 5.2).

При охолодженні аморфного тіла його температура буде поступово і безперервно знижуватись. Це означає, що перехід з рідкого стану в твердий для аморфного тіла є поступовим, і конкретна температура плавлення не фіксується (рис. 5.2, крива а).

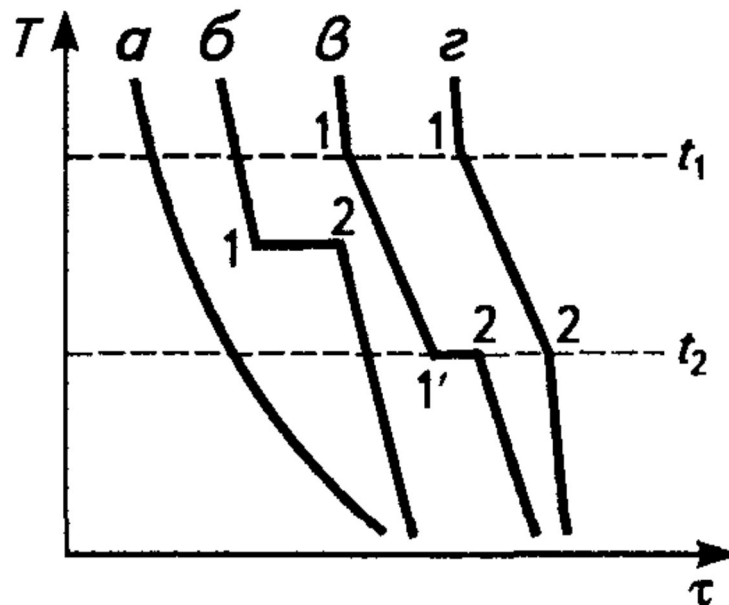


Рисунок 5.2 Графіки охолодження при твердінні аморфного тіла (а), чистого металу (б), сплаву з евтектикою (в), сплаву з утворенням твердого розчину (г) [3]: t_1 і t_2 – температури початку і кінця кристалізації сплавів

Кристалічні речовини (метали, сплави) мають певну фіксовану температуру плавлення (при нагріванні) та кристалізації (при охолодженні). Кристалізація чистих металів (рис. 5.2) відбувається за постійної температури, а сплавів – в інтервалі температур. 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).

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 визначення за ними критичних температур фазових перетворень. Температури початку кристалізації сплаву називають *точками ліквідус* (від лат. liquidus – рідкий), а закінчення кристалізації – *солідус* (від лат. solidus – твердий).

Обладнання для термічного аналізу складається з нагрівальної та контролюючої температури апаратури. Для побудови діаграми стану на осі абсцис відкладають концентрацію (вміст) компонентів досліджуваних сплавів (рис. 5.3). 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 водну 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: концентрації компонентів, температури, заданої швидкості охолодження; дозволяють простежити зміни (за визначених умов) певних фізичних і механічних властивостей.

Правило фаз. Закон Гіббса. Кількість ступенів свободи визначає кількість незалежних перемінних (температура, концентрація, тиск), які, не порушуючи рівноваги системи, можна змінювати у певних межах. Рівноважним називають такий стан сплаву, що не змінюється у часі. При рівновазі зберігається й кількість співіснуючих фаз. Якщо за таких умов можна змінювати лише температуру (одна змінна), то кількість ступенів свободи дорівнює одиниці; якщо температура і склад фази будуть постійними, кількість ступенів свободи дорівнюватиме нулю. Кількість ступенів свободи позначають літерою С.

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 кількістю ступенів свободи системи:

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

де С – кількість ступенів свободи; К – кількість компонентів; В – зовнішні змінні фактори (температура, тиск); Ф – кількість фаз.

Правило відрізків. Правило відрізків дозволяє визначити склад фаз і кількісне співвідношення між ними при різних температурах у двофазовій області діаграми. В однофазовій області правило відрізків не застосовується.

Перше положення правила відрізків можна сформулювати так. Для знаходження складу рівноважних фаз у будь-якій точці через неї проводять коноду – пряму, паралельну до осі складу, яка перетинається з лініями, що обмежують дану двофазову область; проекція точки перетину з лінією ліквідус на вісь складу покаже концентрацію компонентів у рідкому розчині, а проекція точки перетину з лінією солідус – концентрацію компонентів у твердому розчині.

Друге положення правила відрізків допомагає вичислити масову частку кожної з двох фаз при заданій температурі. Масова частка одної фази у вибраній точці дорівнює відношенню довжини відрізка коноди.

Простежимо за процесом кристалізації сплаву концентрації K_2 (рис. 5.4, б). При температурі точки O сплав є в однофазовій області рідкого розчину P . В точці 1 починається кристалізація сплаву і в точці 2 вона закінчується. Нижче від точки 2 жодних структурних перетворень у сплаві немає. Виберемо на лінії концентрації K_2 точку a . У названій точці в рівновазі перебувають дві фази – рідкий розчин P і твердий розчин a . Щоб визначити склад фаз при температурі точки a , скористаємось першим положенням правила відрізків і проведемо через цю точку горизонтальну лінію до перетину з лініями ліквідус в точці b і солідус в точці c . Спроекувавши на вісь складу ці точки, отримаємо точки b_1 і c_1 , які показують склад рідкого й твердого розчинів відповідно. Аналогічно при температурі початку кристалізації склад рідкого розчину визначається точкою 1_1 , а при температурі кінця кристалізації – точкою d_1 . Відповідно склад твердого розчину при температурі початку кристалізації показує точка f_1 і при температурі кінця кристалізації – точка 2_1 .

Таким чином, склад рідкого розчину в процесі кристалізації змінюється по лінії ліквідус на відріжку $1d$, а склад твердого розчину – по лінії солідус на відріжку $f2$. Якщо кристалізація відбувається у рівноважних умовах, то вирівнюється хімічний склад твердого розчину завдяки дифузії, в результаті чого при температурі точки 2 весь твердий розчин матиме склад цієї точки. *Масова частка Q рідкого розчину P для точки a відповідно до другого положення правила відрізків становить:*

$$Q_p = ac \times 100\% / bc, \quad (5.6)$$

і масова частка Q_T твердого розчину a -

$$Q_T = ba \times 100\% / bc. \quad (5.7)$$

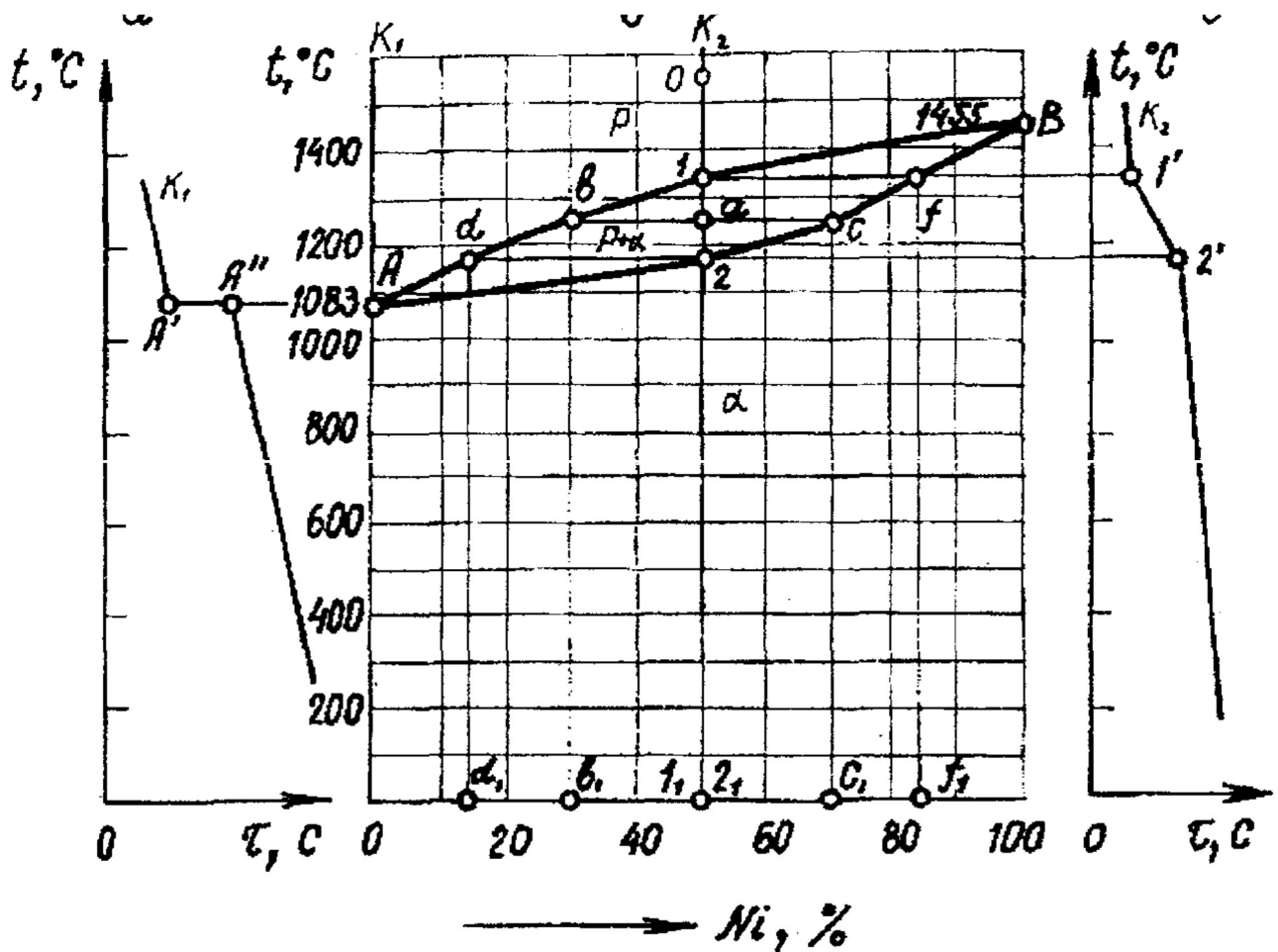


Рисунок 5.4 Діаграма стану сплавів системи Cu – Ni (б) і криві охолодження міді (а) та сплаву складу K2 (в): t - температура; τ - час.

Таким чином, склад рідкого розчину в процесі кристалізації змінюється по лінії ліквідус на відрізку 1d, а склад твердого розчину – по лінії солідус на відрізку f2. Якщо кристалізація відбувається у рівноважних умовах, то вирівнюється хімічний склад твердого розчину завдяки дифузії, в результаті чого при температурі точки 2 весь твердий розчин матиме склад цієї точки. Масова частка Q рідкого розчину P для точки a відповідно до другого положення правила відрізків становить:

$$Q_p = ac \times 100\% / bc, \quad (5.6)$$

і масова частка Q_t твердого розчину a –

$$Q_t = ba \times 100\% / bc. \quad (5.7)$$

Крива охолодження сплаву концентрації K2 (рис. 8.4, в) складається із трьох ділянок: верхньої, що лежить над точкою 1', середньої – між точками 1' і 2' та нижньої - під точкою 2'. У межах верхньої та нижньої ділянок маємо одну фазу – рідкий розчин P та твердий розчин a відповідно, а в межах середньої ділянки – одночасно обидві названі фази ($\Phi=2$). 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'. Кристалізація сплаву в деякому інтервалі температур характерна для моноваріантної рівноваги, коли кількість ступенів вільності дорівнює одиниці ($C = K+1-\Phi = 2+1-2 = 1$).

Крива охолодження міді (рис. 5.4, а) складається також із трьох ділянок: верхньої, середньої та нижньої. У межах середньої ділянки між точками А' і А'' ($t=1083\text{ }^{\circ}\text{C}$) маємо одночасно дві фази — кристали міді 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 ($C = K+1-\Phi=1 + 1-2=0$).

ТЕМА № 6 Основні типи діаграм стану сплавів. Діаграми стану подвійних систем

Діаграми стану сплавів графічно показують залежність стану сплавів даної системи від концентрації (хімічного складу) 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. Розглянемо діаграми стану в загальному вигляді для пар компонентів, які умовно позначимо А і В. Залежно від взаємодії металів А і В у твердому стані вони утворюють діаграми стану різних типів.

Діаграма стану сплавів I роду – це діаграма стану сплавів, компоненти яких необмежено розчинні в рідкому стані та практично нерозчинні у твердому (з евтектикою чистих компонентів) (рис. 6.1). До таких сплавів належать, наприклад, сплави систем Pb – Sb; Sn – Zn. У твердому стані вони утворюють механічну суміш кристалів компонентів. Така суміш, якщо вона закристалізувалась з рідини за температури нижчої від температур плавлення компонентів сплаву, називається *евтектикою*, або евтектичною сумішшю (eutektos – з грецької означає легкоплавкий). Сплави хімічного складу, при якому кристалізується лише евтектика (точка Е діаграми), називають *евтектичними*. Сплави, що за складом розташовані на діаграмі ліворуч від евтектичного, називають *доевтектичними*, а праворуч – *заевтектичними*.

Якщо два компоненти у твердому стані нерозчинні один в одному (утворюють механічну суміш), добавка одного компонента до іншого знижує температуру початку тверднення (лінія ліквідус на діаграмі). Температура ж закінчення твердіння (лінія солідус) не залежить від складу сплаву даної системи і однакова для всіх сплавів, утворених даною парою компонентів. При температурах точок а і b у розплаві утворюються кристали А (у сплаві 1) і В (у сплаві 3). Нижче точок а і b рідина пересичена відповідно компонентами А і В. При цьому їх вміст у рідині знижується. Так, при охолодженні сплаву 1 в інтервалі аЕ' у розплаві зменшується кількість А по лінії аЕ і при температурі точки Е' вона досягає складу точки Е діаграми.

Таким же чином і розплав сплаву 3, збіднюючись при охолодженні компонентом В, досягає за складом тієї самої точки Е при охолодженні його до температури точки Е". В обох випадках розплави сплавів 1 і 3 при охолодженні до температур Е' і Е" стають насиченими компонентами А і В. Вони виділяються з рідини водночас при остаточній кристалізації, утворюючи суміш А + В (евтектику). Евтектичне перетворення відбуватиметься для кожного із сплавів даної системи: у доевтектичному (сплав 1) при температурі точки Е', а у заевтектичному (сплав 3) – при температурі точки Е". Для сплаву евтектичного складу (сплав 2) первинні кристали А чи В з рідкої фази не виділяються і при температурі Е кристалізуються одразу у вигляді суміші А+В, тобто твердий сплав на 100% складатиметься з евтектики.

компонентів. Верхня крива m (рис. 6.3) - ліквідус, нижня n - солідус. Зміна кривих охолодження сплавів різного складу та структури в залежності від стану сплавів показані на рис. 6.4. Прикладом таких сплавів може слугувати система сплавів $\text{Cu} - \text{Ni}$.

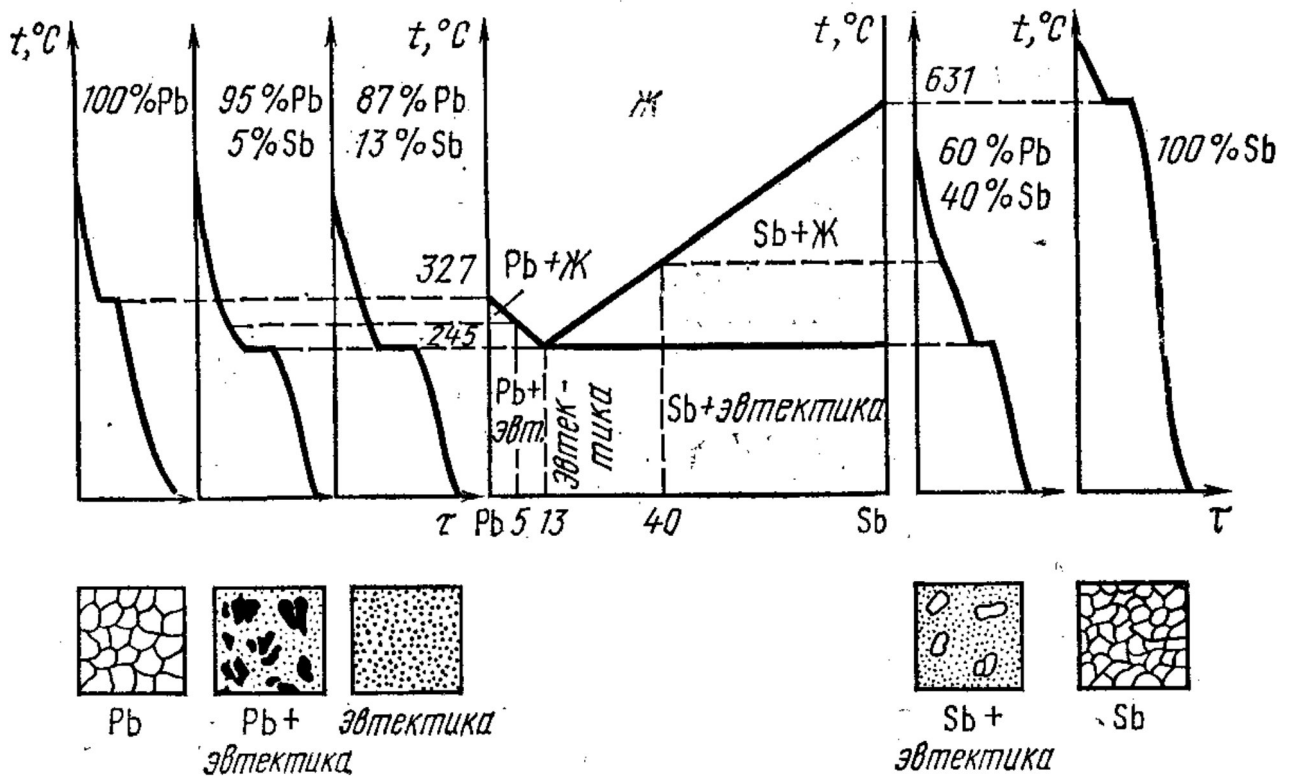


Рисунок 6.2 Діаграма стану сплавів Pb-Sb

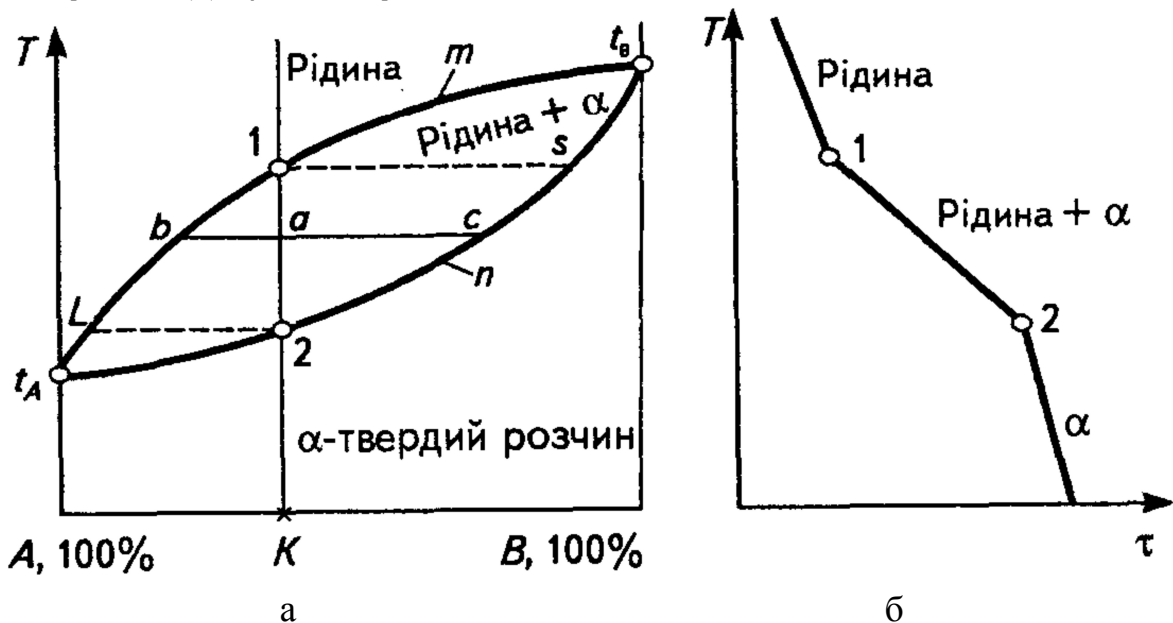


Рисунок 6.3 Діаграма стану (а) та крива охолодження (б) сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому і твердому станах

Діаграма стану сплавів III роду це діаграма сплавів, компоненти яких утворюють тверді розчини з обмеженою розчинністю (з евтектикою твердих розчинів). Така діаграма характерна, наприклад, для системи сплавів $\text{Cu} - \text{Ag}$ (рис. 6.4). Крива AEB – ліквідус, крива ADECB – солідус. Кристали твердого розчину втілення атомів компонента B у кристалічній ґратці компонента A (α -твердий розчин) випадають при температурах відповідно лінії AD . При

температурах і концентраціях компонентів, що відповідають лінії СВ, кристалізуються тверді розчини втілення атомів компонента А у кристалічній ґратці компонента В (b-твердий розчин). Сплав, склад якого відповідає точці Е на діаграмі, кристалізується з утворенням евтектики (a + b).

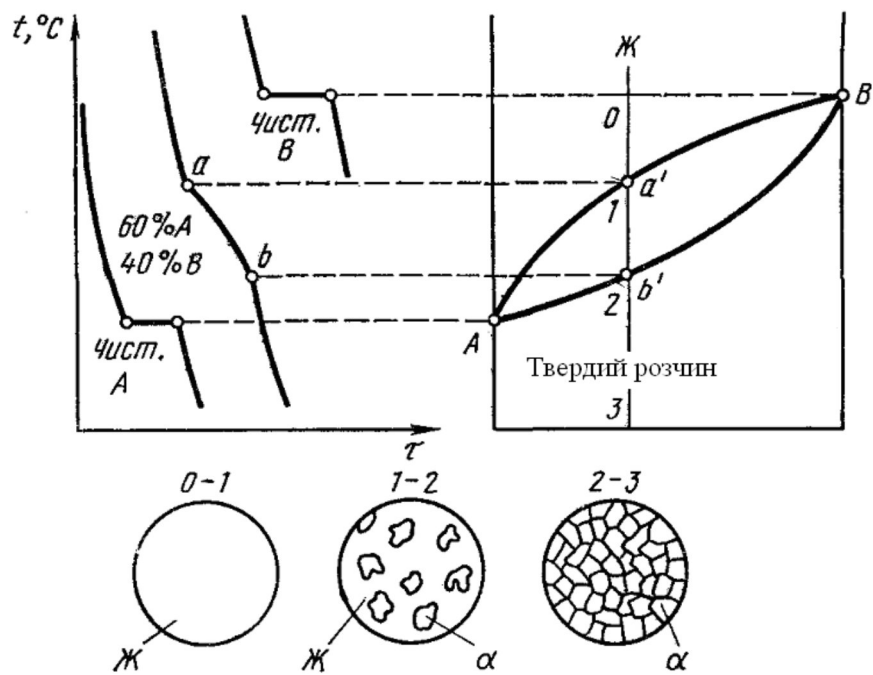
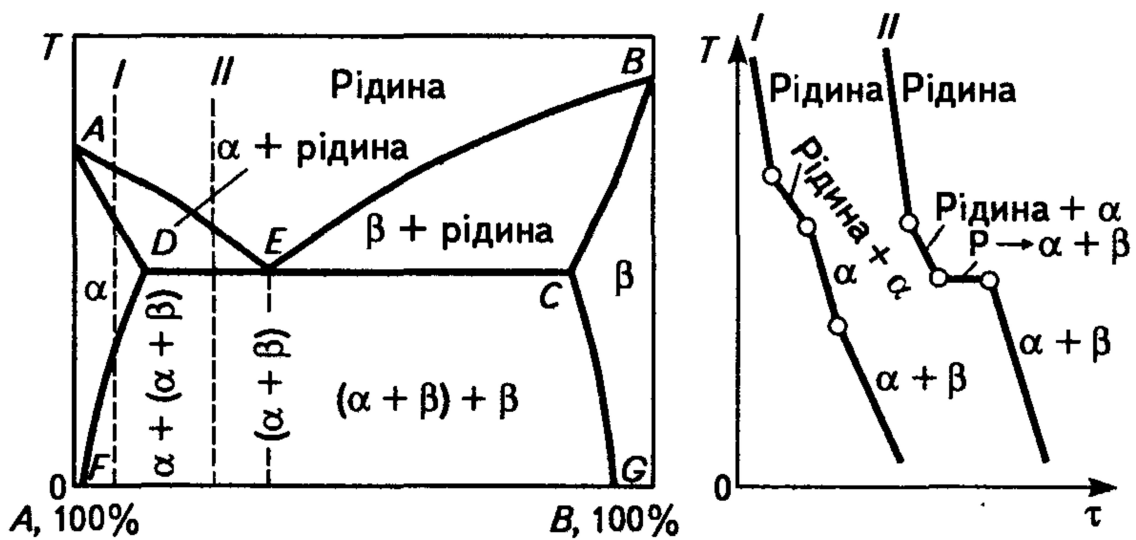


Рисунок 6.4 Зміна кривих охолодження сплавів різного складу та структури залежно від стану сплавів

Сплави між точками D і С після кристалізації з розплаву складаються з кристалів а-твердого розчину і евтектики (a + b), а між точками С і Е – з кристалів b – твердого розчину і евтектики (a + b). сплави з вмістом компонента В, меншим ніж у точці D, закінчують кристалізацію по лінії AD і складаються з кристалів а. При зниженні температури (лінії DF) ці кристали стають пересиченими щодо компонента В, тому з твердого α-розчину утворюються кристали β_{II}-твердого розчину. Таку кристалізацію з твердого розчину називають *вторинною*, а з рідкого розчину – *первинною*. У сплавах з вмістом компонента В, більшим ніж у точці Е, при температурах нижчих лінії ЕС, з кристалів твердого β-розчину утворюються кристали α_{II}.



а

б

Рисунок 6.5 Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (а) та криві охолодження (б)

Діаграма стану сплавів IV роду – це діаграма стану сплавів з утворенням хімічної сполуки. Такий тип діаграми (рис. 6.6) характерний, наприклад, для сплавів системи Mg-Ca. Хімічну сполуку A_nB_m (Mg_4Ca_3) можна розглядати як третій компонент, що поділяє діаграму стану системи A – B (Mg-Ca) на дві діаграми першого типу: системи A – A_nB_m (Mg – Mg_4Ca_3) та A_nB_m – B (Mg_4Ca_3 – Ca).

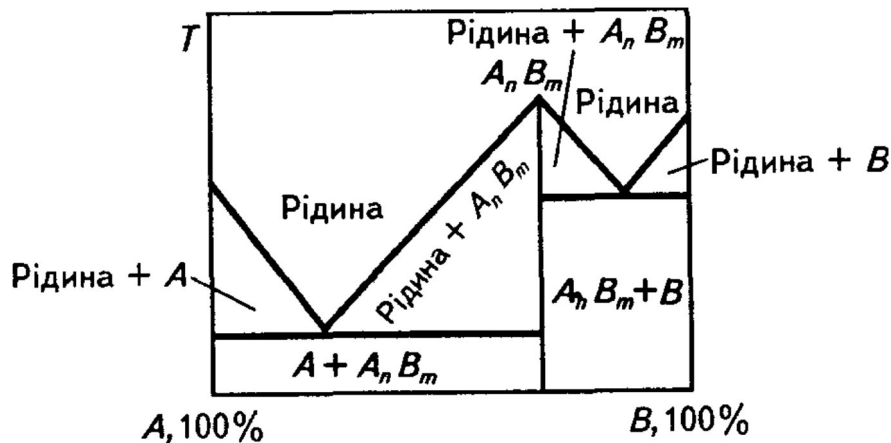


Рисунок 6.6 Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічну сполуку

Зв'язок між типом діаграми стану сплаву і властивостями сплавів за М.С. Курнаковим

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 М. С. Курнаковим. Так, на рис. 6.7 показані зміни властивостей залежно від типу діаграми стану двокомпонентних систем. Властивості сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані, що утворюють механічні суміші у твердому, змінюються за прямолінійним законом (рис 6.7, а). Тому створити сплав у цій системі, механічні і електричні властивості якого б перевищували властивості вихідних компонентів, неможливо. У разі утворення компонентами необмежених твердих розчинів властивості сплавів змінюються нерівномірно за криволінійним законом (рис. 6.7, 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. 6.7, в).

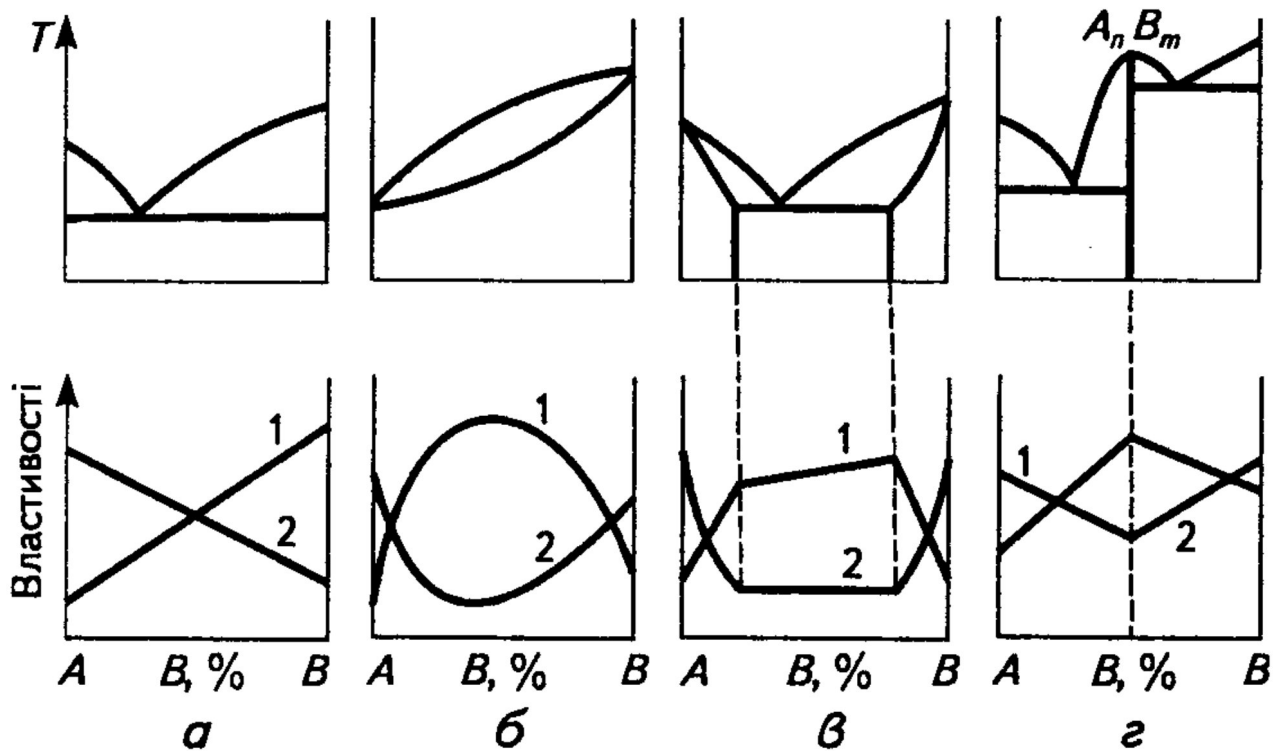


Рисунок 6.7 Діаграми стану та властивостей сплавів (за М. С. Курнаковим): 1 – твердість; 2 – електропровідність: а – діаграма I роду; б - діаграма II роду; в – діаграма III роду; г – діаграма IV роду;

Утворення в системі хімічних сполук (рис. 6.7, 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.

ТЕМА № 7 Діаграма стану залізо-вуглець, фазовий склад, структурні складові залізобуглецевих сплавів та їх властивості

Залізо та його взаємодія з вуглецем

Залежно від вмісту вуглецю залізобуглецеві сплави поділяють на сталі (до 2,14 % C) і чавуни (більше 2,14 %). Діаграма стану системи Fe – C графічно зображує фазовий стан залізобуглецевих сплавів залежно від вмісту вуглецю та температури за умови дуже повільного їх охолодження або нагрівання. Основою для побудови такої діаграми (рис. 7.1) є дослідження Д. К. Чернова, пов'язані з відкриттям критичних температур (точок), що залежать від вмісту вуглецю у сплаві, а також уявлень щодо закономірності зміни при певних температурах структурного стану і властивостей залізобуглецевих сплавів. Діаграму стану системи Fe-C використовують у теорії та практиці термічної обробки сталей і чавунів.

Діаграма стану залізо-вуглець

Діаграма Fe-C (рис. 7.1) показана лише для інтервалу концентрації вуглецю від 0 до 6,67 %, тобто до утворення хімічної сполуки Fe₃C (цементит). Лише ця частина діаграми має практичне значення, оскільки сплави з більш високим вмістом вуглецю дуже крихкі. По осі абсцис на діаграмі показано концентрацію вуглецю в масових частках (мас. %), а по осі ординат – температуру в градусах Цельсія (T, °C). Якщо розглядати Fe₃C як компонент, то для переведення концентрації вуглецю в концентрацію цементиту вміст вуглецю слід помножити на 15.

При охолодженні залізобуглецевих сплавів вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти із залізом, утворюючи Fe₃C, але й виділятися у вільному стані у вигляді графіту. Тому розрізняють дві діаграми стану: залізо-цементит (Fe-Fe₃C) і залізо-графіт (Fe-C).

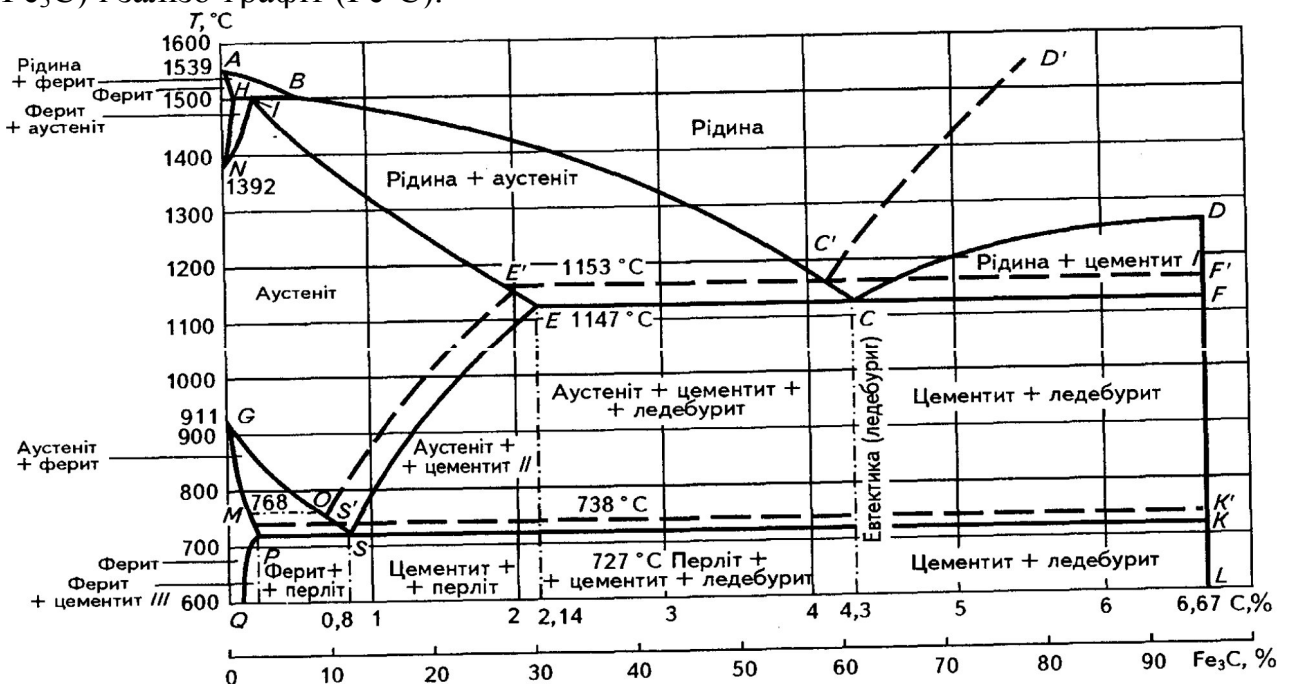


Рисунок 7.1 Діаграма фазової рівноваги залізобуглецевих сплавів [1]: суцільні лінії – цементитна (метастабільна) система; штрихові лінії – графітна (стабільна) система

На діаграмі перша зображена суцільними лініями, друга – штриховими. Оскільки цементит за певних умов розпадається з утворенням вільного вуглецю (графіту), то діаграму в системі Fe – Fe₃C називають нестабільною (метастабільною), а у системі Fe – C – стабільною. Всі лінії стабільної системи Fe – C розташовані на діаграмі вище ліній метастабільної Fe – Fe₃C. Основними фазами залізовуглецевих сплавів є рідкі та тверді розчини вуглецю у залізі, цементит та графіт (див. рис. 7.1). У розплаві заліза при температурі 1147 °C розчиняється до 4,3 % вуглецю. У твердих розчинах заліза (ферит, аустеніт) розчинність вуглецю значно менша. Твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної ґратки (ОЦК) заліза називають **феритом** (Ф). Високотемпературний δ – ферит містить максимальну кількість вуглецю – 0,1 %. У низькотемпературному α-фериті максимальна розчинність вуглецю становить 0,025 % при 727 °C, а при зниженні температури зменшується практично до нуля. Ферит м'який (80...100 НВ), пластичний, нижче 768 °C магнітний.

Твердий розчин втілення вуглецю на основі гранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК) γ - заліза називають **аустенітом** (А). Розчинність вуглецю в γ-залізі при зростанні температури підвищується і досягає максимуму (2,14 % C) при 1147 °C. Аустеніт пластичний, немагнітний, твердість його 170 НВ. Хімічна сполука, яка утворюється в залізовуглецевих сплавах, карбід заліза Fe₃C, має назву **цементит** (Ц). Це найбільш тверда (780 НВ) і крихка фаза в системі залізо - вуглець, нижче 217 °C магнітна.

Цементит містить 6,68 % C, має складну орторомбічну кристалічну ґратку з дванадцятьма атомами заліза і чотирма вуглецю, температура плавлення становить близько 1600 °C. У сплавах з вмістом вуглецю більше 4,3 % може випадати одразу при охолодженні розплаву *первинний цементит*. *Вторинний* виділяється з аустеніту вздовж лінії ES діаграми, *третинний* - з фериту вздовж лінії PQ.

Евтектоїдна (механічна) суміш фериту та цементиту, яка утворюється при 727 °C і вмісті вуглецю 0,8 %, має назву **перліт** (П). Залежно від будови перліту змінюються і його властивості. Так, пластинчастий перліт більш твердий, крихкий та міцніший за зернистий (160...230 НВ; σ_в = 600...800 МПа; δ = 15...20%).

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

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 заліза графіт є стабільною фазою, а цементит – лише відносно стабільною.

Лінії діаграми стану системи Fe – Fe₃C (див. рис. 7.1) показують, за яких температур у залізовуглецевих сплавах відбуваються перетворення. Лінія ABCD, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів з різним вмістом вуглецю, називається *лінією ліквідусу*.

Лінія ANIECF, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається *лінією солідусу*. GOS - лінія верхньої границі області рівноваги α - та γ -фаз. При охолодженні по цій лінії починається виділення α -фази (при нагріванні - γ -фази). SE – лінія початку перетворення аустеніту з утворенням цементиту при охолодженні (критичні точки A_{cm}), при нагріванні сплаву критичні точки A_{cm} . PQ – лінія початку виділення цементиту (третинного) при охолодженні або розчинення третинного цементиту при нагріванні. Однофазні області δ -фериту, α -фериту та аустеніту обмежені відповідно лініями AN, GPQ і NIESG. Деякі лінії діаграми відображають такі температурні і концентраційні умови, за яких у рівновазі перебувають три фази. Так, лінія HIB при перитектичній температурі 1499 °C характеризується наявністю трьох фаз: δ -фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Сплави по лінії ECF, що відповідає евтектичній температурі 1147 °C, складаються з рідини, аустеніту і цементиту. Сплави на лінії PSK, яка відповідає евтектоїдній температурі 727 °C, складаються з аустеніту, фериту і цементиту. При температурах 768 °C (лінія MO для сталі) і 210 °C (для чавуну) спостерігається магнітне перетворення відповідно фериту і цементиту.

Характерні точки на діаграмі відповідають певним температурам і концентраціям вуглецю (мас. %). Точка A відповідає температурі плавлення (або кристалізації) чистого заліза (1539 °C). Точка B вказує на вміст вуглецю (0,5 %) у рідкій фазі при перитектичній температурі (1499 °C). Точка H відповідає граничній кількості вуглецю (0,1 %) у δ -фазі при перитектичній температурі. Точка I вказує на вміст вуглецю (0,16 %) в аустеніті, який перебуває в рівновазі з δ -фазою і рідиною при перитектичній температурі. Точка C вказує на вміст вуглецю (4,3 %) у рідкій фазі в стані рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147 °C).

Точка E відповідає 2,14 % C в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі. Точка S відповідає 0,8 % C в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит + цементит) при евтектоїдній температурі (727 °C). Точка P відповідає 0,02 % C – граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі. Структурні складові залізовуглецевих сплавів показані на рис. 7.2.

У промислових чавунах основною структурною складовою є графіт. Це одна з поліморфних модифікацій (різновидів) структурно вільного вуглецю з гексагональною кристалічною ґраткою. Твердість і міцність графіту низькі. У сірих чавунах він має вигляд пластин різної форми і розмірів, у ковкому – форму пластівців, у високоміцному – кулясту форму (рис. 7.3).

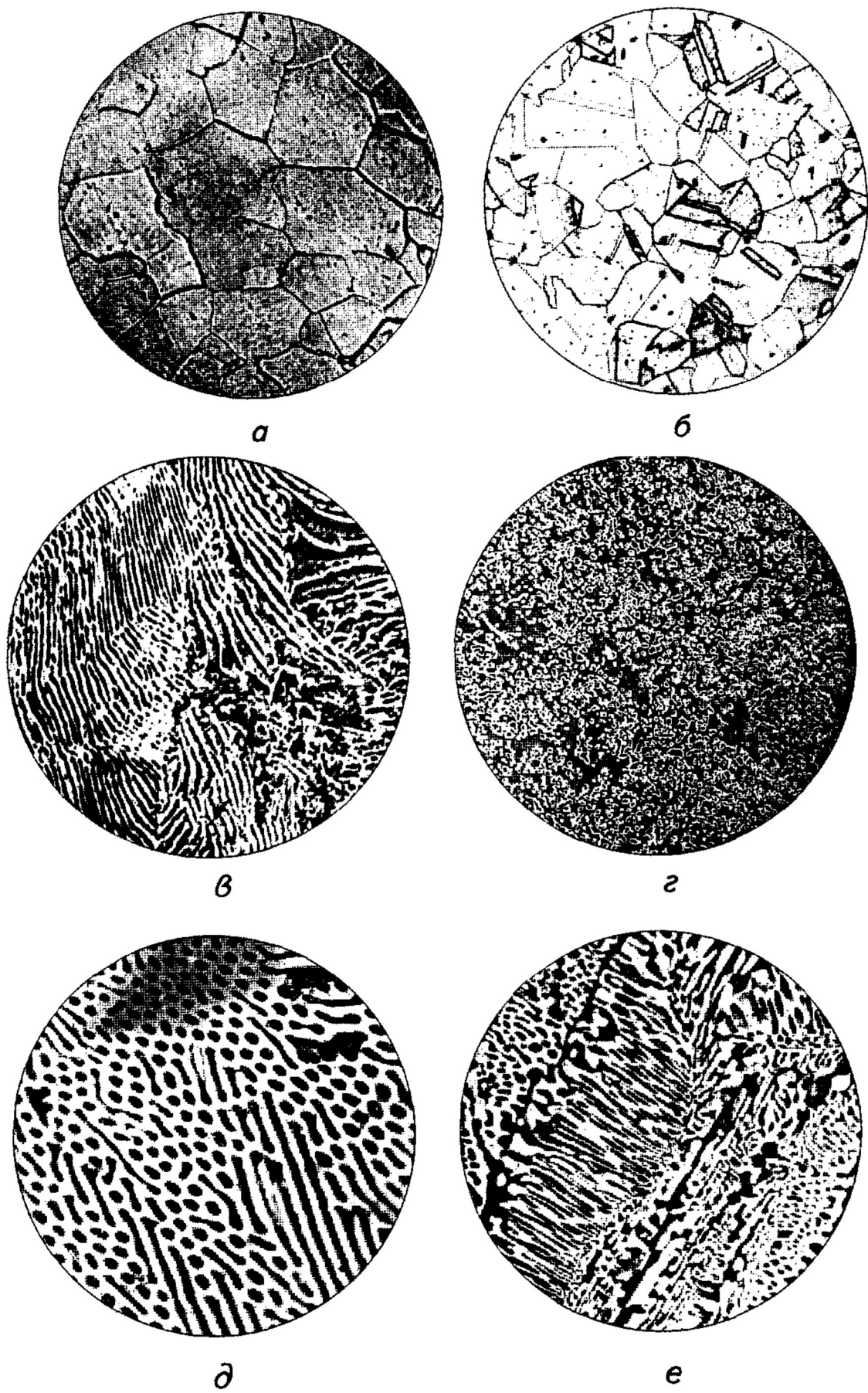


Рисунок 7.2 Мікроструктури залізовуглецевих сплавів: а – ферит, х200; б– аустеніт, х 100; в – перліт пластинчастий, х200; г – перліт зернистий, х200; д, е – ледебурит, х350

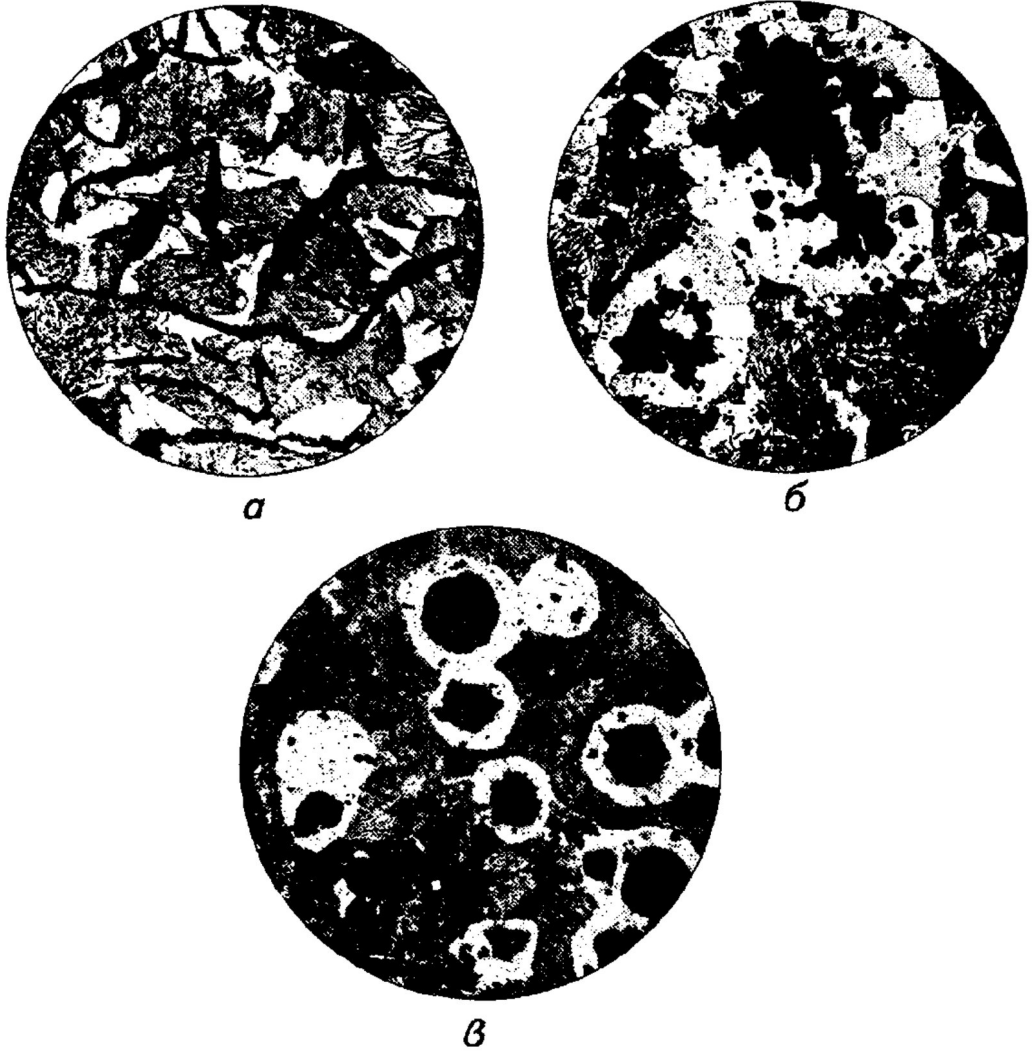


Рисунок 7.3 Морфологічні форми графіту в сірому (а), ковкому (б) і високоміцному чавунах (в), $\times 200$

ТЕМА № 8 Фізичні методи дослідження структури металів і сплавів

Для вивчення структури та фазового складу металів і сплавів використовують різні методи, основними з яких є металографічні – макро- та мікроструктурний аналізи, електронна мікроскопія, рентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналізи, а також методи магнітного і ділатометричного аналізу, внутрішнього тертя і термоелектрорушійних сил.

1. Макро- та мікроструктурний аналізи

Макроструктурний аналіз застосовують для вивчення будови металів і сплавів неозброєним оком або через лупу при збільшенні до 30 разів. За допомогою цього методу виявляють дендритну будову, усадкову пухкість, шлакові включення, газові пухирі та інші порожнини, тріщини, ліквіацію елементів (зокрема сірки і фосфору), структурну неоднорідність, волокнисту будову поковок і штамповок, якість зварного шва. Макроструктуру вивчають на зламі зразка або на спеціально вирізаному зразку (темплеті), а також безпосередньо на поверхні деталей після їх шліфування і травлення спеціальними реактивами. Для вивчення макроструктури металу або сплаву застосовують реактиви для поверхневого і глибокого травлення, які відрізняються між собою, в основному, концентрацією і температурою травлення. *Глибоке травлення* проводять при температурі 60...70°C більш концентрованими розчинами кислот і лугів протягом десятка хвилин. Його застосовують для виявлення дефектів, що порушують суцільність металу (тріщини, пори, раковини), використовуючи водний розчин соляної кислоти (50 см³ HCl, 50 см³ H₂O); t = 60...80 °C, час травлення – 5...45 хв. Для виявлення дендритної структури литої сталі, використовують 15 %-ний водний розчин персульфату амонію, t = 80...90°C; тривалість травлення 5...10 хв.

При *поверхневому травленні* для виявлення ліквіації сірки використовують 5%-ний водний розчин сірчаної кислоти (метод Баумана); для виявлення ліквіації фосфору-реактив, що містить 85 г хлористої міді, 53г хлористого амонію та 1000 см³ води (метод Гейна).

Мікроструктурний аналіз застосовують для дослідження структури металів за допомогою мікроскопів (оптичних світлових та електронних) з метою визначення мікроструктури і фазового складу сталей і сплавів, дослідження ступеня однорідності сплавів за розподілом різних фаз, їх розмірів та форм: визначення кількісного співвідношення структурних складових, виду термічної обробки та складу сплаву за кількісним співвідношенням фаз. Виявлення структури металів і сплавів ґрунтується на нерівномірному розчиненні в реактиві різних структурних складових. Неоднорідні структурні складові сплавів характеризуються більшою протравлюваністю, ніж однорідні. Для травлення сплавів застосовують різні за складом реактиви: 3...4%-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті для травлення залізовуглецевих сплавів; 10%-ний водний розчин персульфату амонію для травлення сплавів на основі міді тощо.

2. Оптична та електронна мікроскопія

Залежно від необхідного збільшення і умов розділення структурних складових у мікроскопах застосовують в основному біле світло (оптична мікроскопія) та електронне проміння (електронна мікроскопія).

Оптична мікроскопія дозволяє досліджувати структуру сплавів при збільшенні до 1500 разів. У нашій країні для вивчення структури сплавів в умовах лабораторій металографії найчастіше застосування отримали вертикальний МІМ-7 і горизонтальний МІМ-8 мікроскопи.

Вимірювання мікроскопічних об'єктів (неметалевий включень, величини зерен, глибини зміцненого шару тощо) проводять за допомогою окуляр-мікрометра і об'єктив-мікрометра та порівнюють з відомими шкалами та таблицями. Окуляр-мікрометр є звичайним окуляром, в який між лінзами вставлена кругла тонка скляна пластина зі шкалою з поділками через 0,1 мм. Об'єктив-мікрометр має скляну пластинку, на якій нанесена шкала з поділками через 0,01 мм (10 мкм). Оксиди, сульфіді і силікати розглядаються на нетравленому шліфі, а карбіди – після травлення (збільшення у 100 разів). Розміри зерна аустеніту на практиці визначають за стандартними методиками: цементациєю, окисленням, феритною або цементитною сіткою, протравлюванням границь зерен спеціальними травниками і співставленням отриманих структур зі стандартними шкалами бальності (рис. 8.1).

Кількісна металографія включає комплекс методів кількісної оцінки мікроскопічної будови металів і сплавів. Параметри будови визначаються за результатами вимірювань і підрахунків на звичайному мікрошліфі розміру зерен, середніх діаметра і площі, об'єму окремих мікрочастинок, сумарної поверхні мікрочастинок, щільності дефектів кристалічної будови тощо. Для визначення розміру зерна порівнюють розмір зерна при збільшенні 100 із стандартною шкалою (шкала балів) або підраховують число зерен, що припадає на одиницю площі поверхні шліфа, або обчислюють середній умовний діаметр зерен, або їх число в 1 мм³ металу. Для первинних обрахунків застосовують ручні лічильники, суматори, інтегратори, інші пристрої.

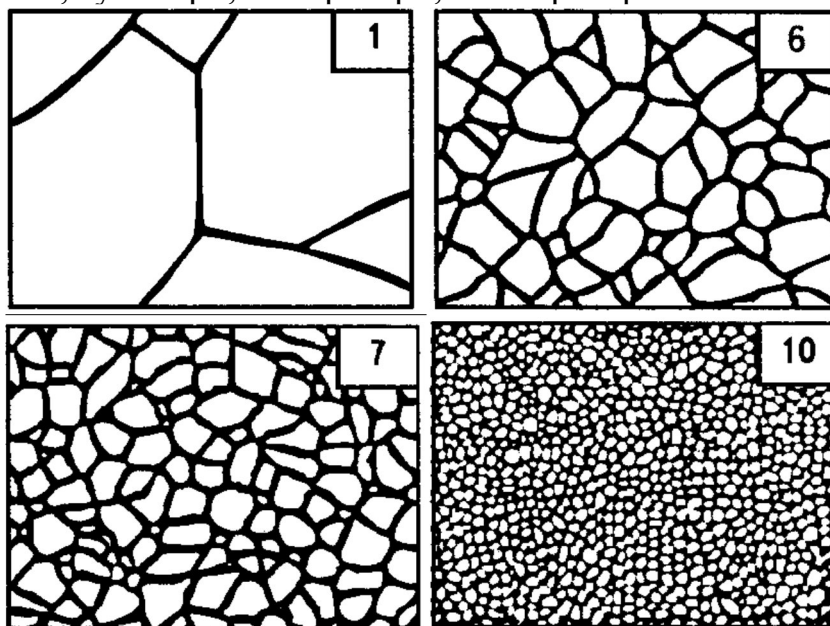


Рисунок 8.1 Шкала для визначення розміру зерна (цифра – бал зерна) (ГОСТ 5639-75)

Таблиця 8.1 Бал зерна та середні характеристики структури зерна (ГОСТ 5639-75)

Бал зерна	Площа зерна, мм ²	Кількість зерен на площі в 1 мм ² , шт.	Кількість зерен в об'ємі в 1 мм ³ , шт.	Діаметр зерна, мм
-3	1,024	1	1	1,000
-2	0,512	2	2,7	0,694
-1	0,256	4	8	0,500
0	0,128	8	21	0,352
1	0,064	16	34	0,250
2	0,032	32	179	0,177
3	0,016	64	512	0,125
4	0,008	128	1446	0,088
5	0,004	256	4096	0,060
6	0,002	512	11417	0,041
7	0,001	1024	32768	0,031
8	0,0005	2048	92160	0,022
9	0,00025	4096	262122	0,015
10	0,000125	8192	737280	0,012
11	0,000062	16384	2097152	0,0079
12	0,000031	32768	5930808	0,0056
13	0,000016	65536	16777216	0,0039
14	0,000008	131072	47448064	0,0027

Електронна мікроскопія – найефективніший метод дослідження структури металів і сплавів. Використання електронного проміння, що характеризується малою довжиною хвилі, дозволяє збільшити роздільну здатність оптичної системи до кількох ангстрем ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ м}$). Збільшення електронного мікроскопа становить 50000...100000 разів. Сучасний електронний мікроскоп складається з джерела електронів – електронної гармати, в якій відбувається не тільки емісія електронів, але і досягається збільшення їх швидкості за рахунок прикладеної напруги. Принципова схема електронного мікроскопа представлена на рис. 8.3.

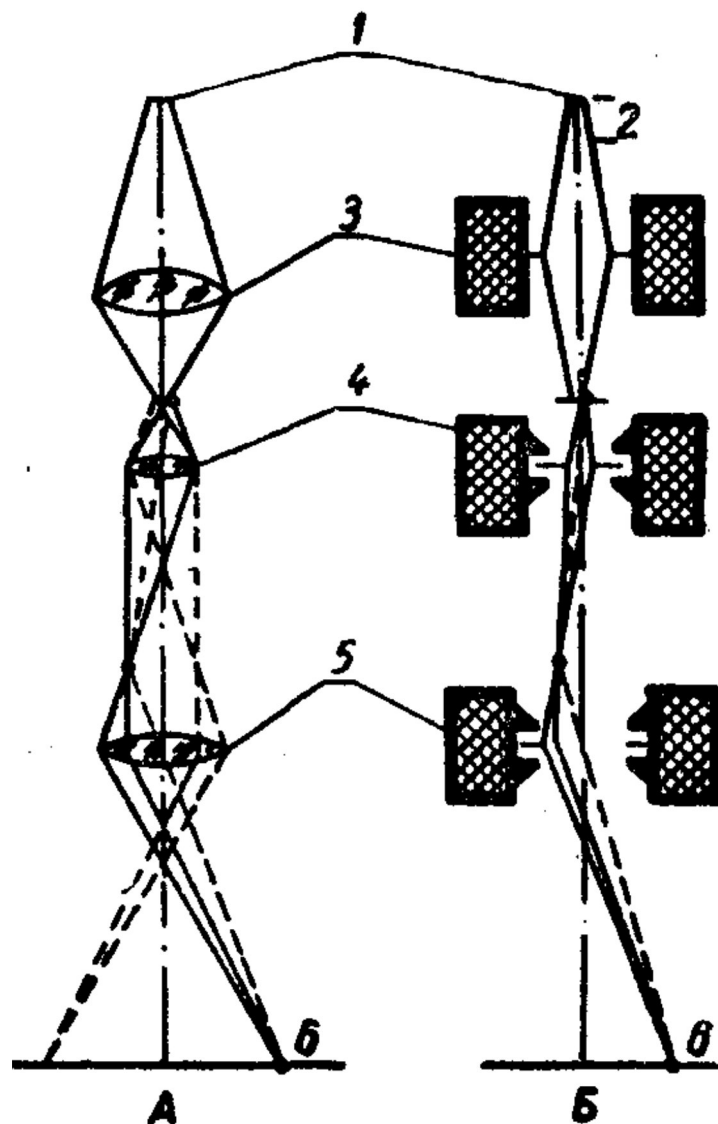


Рисунок 8.2 Принципова схема оптичного (А) і електронного (Б) мікроскопа [6]: 1 – джерело випромінювання; 2 – анод; 3 – конденсор; 4 – об’єктив; 5 – проєкційна лінза; 6 – зображення

Електрони вилітають з гармати при нагріванні вольфрамової спіралі, що є катодом. Між спіраллю і анодом, що знаходиться на невеликій відстані від спіралі, створюється потужне електричне поле, необхідне для підвищення швидкості руху електронів. Анодом є пластина з отвором посередині. Електрони проходять через отвір в розташовану нижче конденсорну лінзу. Конденсорна або розташовані далі об’єктивна і проєкційні лінзи мають значне за величиною магнітне або електростатичне поле. Далі потік електронного проміння потрапляє на об’єкт, що підлягає дослідженню. Залежно від методу дослідження об’єкта існує ряд конструкцій мікроскопів:

1. *Просвічуючі мікроскопи*, в яких потік електронів проходить через об’єкт, (*просвічує*); отримане зображення є результатом різного розсіювання електронів об’єктом.

2. *Відбивні мікроскопи*, в яких зображення створюється електронами, відбитими поверхнею об’єкта. Ці мікроскопи мають принципову схему оптичної системи, близьку до металомікроскопа.

3. *Емісійні мікроскопи*, в яких зображення створюється від поверхні, що світиться під дією електронів.

4. *Растрові мікроскопи*, де зображення створюється за рахунок вторинної емісії електронів, випромінюваних поверхнею, на яку падає потік первинних електронів безперервно рухомий по цій поверхні.

Просвічуючі мікроскопи найбільш поширені, оскільки ще не вдалося використати електронний мікроскоп для роботи з відбитим електронним промінням. Це пояснюється тим, що при відбитті електронного проміння поверхнею непрозорого об'єкта, наприклад металу, виникають значна хроматична аберація та інші явища, що призводять до різкого зниження роздільної здатності мікроскопа і, отже, до втрати цієї основної переваги електронного мікроскопа.

Застосування просвічуючого мікроскопа в біології, медицині і деяких інших галузях не зустрічає значних труднощів, оскільки об'єкти прозорі для електронів. Проте використання просвічуючого мікроскопа в металознавстві вимагає приготування спеціальних об'єктів, оскільки метали практично непрозорі для електронів.

Для дослідження металів готують спеціальний об'єкт або зліпок з металевого шліфа. Він є прозорим для електронів і настільки тонким, що не виявляє своєї власної структури. Дослідження за допомогою електронного мікроскопа проводять таким чином. У спеціальну камеру встановлюють особливим чином приготовлений прозорий об'єкт, потім, перевіривши герметичність системи (всіх елементів мікроскопа), включають вакуумні насоси і при досягненні необхідного розрідження вмикають напругу вольфрамової спіралі електронної гармати. Після цього вмикають високу напругу, створюючи електричне поле для підвищення швидкості електронів.

Потім підмагнічують струм, що живить електромагнітні лінзи і, поступово пересуваючи об'єкт, розглядають його ділянки, вивчають будову та структуру і, якщо необхідно, проводять фотографування. У мікроскопах багатьох конструкцій можна ізолювати камеру об'єкта і фотокамеру від решти частини мікроскопа. Це дає можливість наповнити повітрям тільки одну частину мікроскопа, а потім замінювати об'єкт дослідження і фотопластину.

Приготування об'єктів дослідження. Об'єкт дослідження повинен бути прозорим і дуже тонким. Безпосереднє вивчення структури навіть дуже тонкого металевго предмету шляхом просвічування неможливе. Ця проблема вирішується шляхом виготовлення прозорих реплік (або зліпків) з поверхні мікрошліфа, що відображають характер цієї поверхні, а, отже, і структури металу; зліпки пропускають електронне проміння. Репліки треба виготовляти з особливою ретельністю, оскільки навіть невеликі відхилення в їх геометричній будові призведуть до неправильного уявлення про структуру металу.

Перш за все необхідно спеціально підготувати поверхню мікрошліфа. Шліф піддають електролітичному поліруванню і спеціальному травленню, що дає рельєфну поверхню. Для отримання більш чіткого рельєфу на шліф іноді осаджують мідь, хром або інші речовини у вакуумній камері, що посилює контрастність зображення. В цьому випадку шліф встановлюють під невеликим кутом до напрямку руху частинок відповідних речовин, які осідають на його

поверхню. Осадження відбувається, головним чином, на виступаючих ділянках шліфа і тому чіткість рельєфу зростає. З приготованих мікрошліфів виготовляють репліки різними методами. Широко використовують, наприклад, спосіб тонких (товщина до 0,1 мкм) лакових реплік або плівок. Зручним методом відокремлення лакової плівки є нанесення на неї розчину желатину. При висиханні желатинова плівка скорочується і знімає лаковий зліпок. Потім знятий шар занурюють у гарячу воду, де желатин розчиняється, а лакова плівка спливає і її виймають спеціальною сіточкою.

При дослідженні лакових плівок одержують негативне зображення, оскільки поглибленням шліфа відповідають виступи на плівці (рис. 3.4).

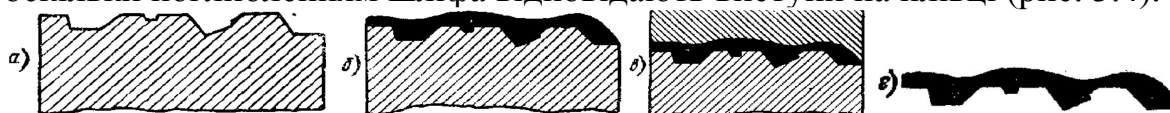


Рисунок 8.3 Приготування лакової плівки: а – протравлений мікрошліф; б – мікрошліф з шаром лака, нанесеним на досліджувану поверхню; в – мікрошліф з шаром желатину, нанесеним на лакову плівку; г – лакова плівка, знята з мікрошліфа

Для визначення хімічного складу фазових складових металу використовують метод аналізу дифракційних зображень, які з'являються при взаємодії електронного променя з краєм поверхні фази, що аналізується. Для цього готується екстракційна репліка (як правило графітова), яка при знятті зі шліфа екстрагує з шліфа необхідну фазу, що аналізується. Потім на край цієї фази в електронному мікроскопі направляється електронний промінь, утворюється дифракційна картина (рис. 3.5), визначається (за формулою Вульфа-Брегга) міжплощинна відстань речовини, яка аналізується. Потім ці дані порівнюють з табличними даними відомих речовин (наприклад, таблиці ASTM (American Society for Testing Materials)), які містять дані про більш як 150 000 речовин. Формула Вульфа-Брегга для визначення міжплощинної відстані:

$$d_{\text{HKL}} = \lambda \cdot L / r, \quad (8.1),$$

де d_{HKL} – міжплощинна відстань; λ – довжина хвилі; L – відстань від джерела електронів до зразка; r – відстань від рефлексу до сліду первинного пучка. При порівнянні розрахункових ($d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$) і табличних (за таблицями ASTM) даних визначають хімічний склад аналізованої речовини.

3. Рентгеноструктурний метод дослідження структури металів і сплавів

Рентгеноструктурний аналіз призначений для визначення тонкої кристалічної структури металів і сплавів (дисперсності блокової будови кристалів, щільності дислокації, дефектів упаковки, макро- та мікронапруги, деформації кристалічних ґраток). При рентгеноструктурному аналізі звичайно використовують проміння з довжинами хвиль 0,5...2,5 Å. Джерелом рентгенівського проміння для структурного аналізу є електронні трубки. На аноді цих трубок нанесений шар певного металу (Cr, Fe, Co, Cu, Mo).

Використовується характеристичне випромінювання K-серії. Дифракційна картина реєструється на рентгенівську фотоплівку або за допомогою детекторів. Залежно від способу реєстрації розрізняють апарати для фотографічного методу і дифрактометри.

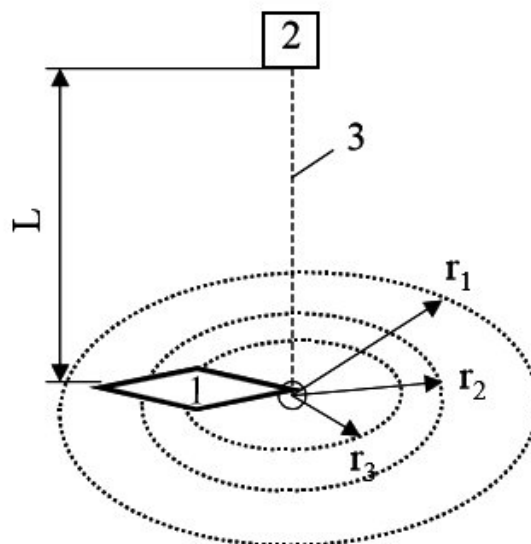


Рисунок 8.4 Дифракційний аналіз складу речовини: 1 – аналізована речовина, 2 – джерело електронів, 3 – електронний промінь

Існують три основні методи рентгеноструктурного аналізу: нерухомого кристалу (метод Лауе); кристалу, що обертається; порошку. Методом нерухомого монокристала визначають симетрію ґраток і вибирають осі координат, використовуючи проміння з безперервним спектром. За методом кристалу, що обертається, відбите від кристалу проміння (монохроматичного – характеристичного випромінювання) фіксується на фотоплівці у вигляді плям. Рентгенограми обертання надають інформацію про структуру монокристала і дозволяють визначати розміри елементарних комірок. Кристал можна представити у вигляді системи паралельних площин (на рис. 8.5), які знаходяться на однаковій відстані d одна від одної. Передбачається, що число атомних площин досить велике і переломлення в кристалі відсутнє. Нехай на кристал падає паралельний пучок монохроматичного (певної довжини хвилі λ) рентгенівського проміння під деяким кутом ковзання ϑ по відношенню до атомної площини кристалу (рис. 8.6). Проміння паралельного пучка відбивається атомними площинами під одним і тим же кутом ϑ . Інтерференційний максимум спостерігатиметься тільки при виконанні умови (формула Вульфа - Брегга):

$$n \lambda = 2d \times \sin \vartheta, \quad (8.2),$$

де n —порядок відбиття.

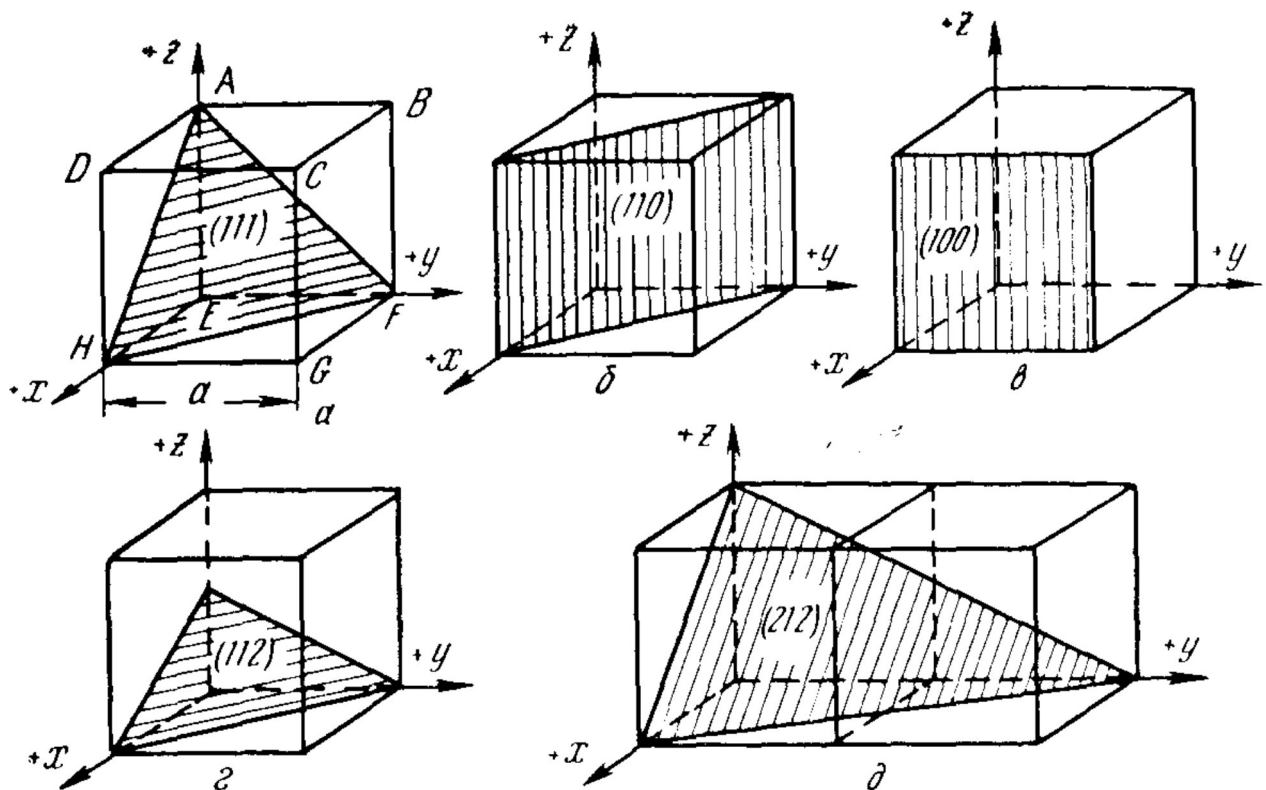


Рисунок 8.5 Приклади кристалографічних площин у кубічній ґратці

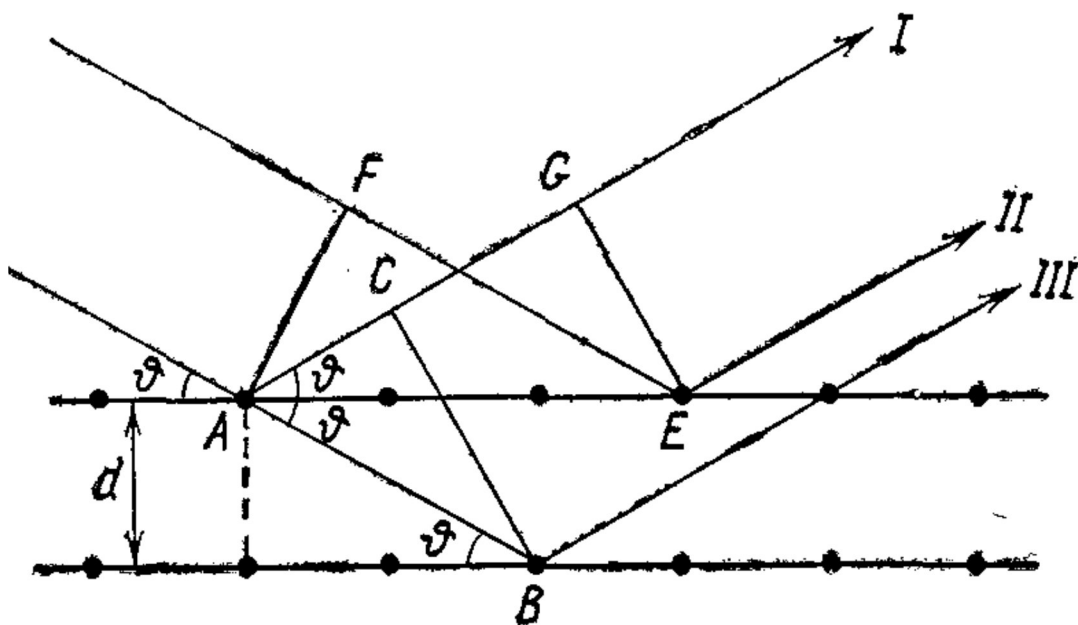


Рисунок 8.6 До висновку формули Вульфа - Брегга

З формули Вульфа-Брегга випливає, що, при експериментальному вимірюванні кута ϑ дифракційних максимумів можна визначити:

а) довжину хвиль, що відповідають цим максимумам, якщо відома міжплощинна відстань d ;

б) міжплощинні відстані d , якщо відомі довжини хвиль λ , що відповідають дифракційним максимумам.

Для вимірювання довжин хвиль або міжплощинних відстаней застосовують різні дифрактометри. Найпростішим є дифрактометр з плоским кристалом, що обертається (рис. 8.7).

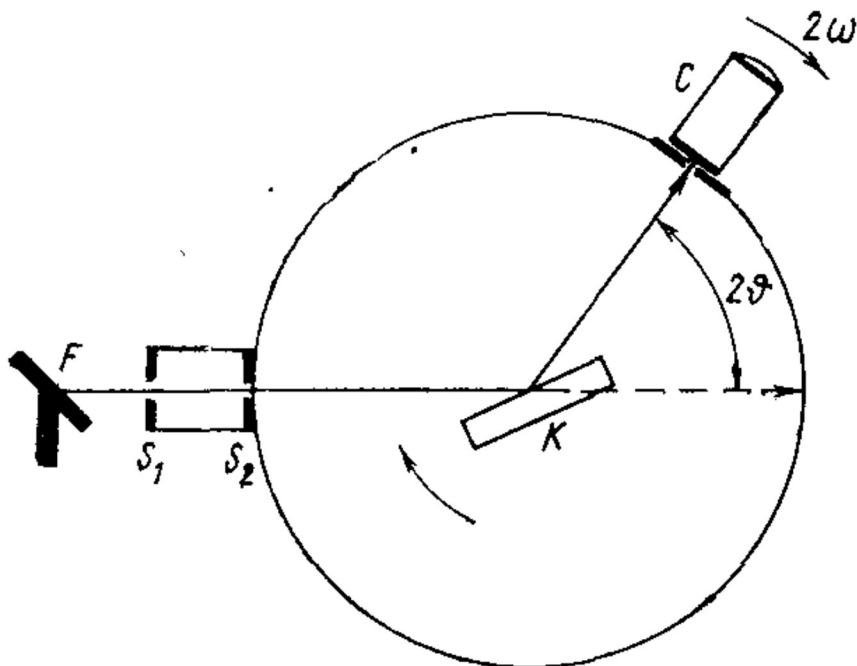


Рисунок 8.7 Схема рентгенівського дифрактометра

Пучок проміння з фокусу рентгенівської трубки F проходить через систему щілин S_1 і S_2 і падає на кристал K , який обертається навколо осі, що проходить через його поверхню. При обертанні кристала змінюється кут між первинним пучком і поверхнею кристала, тобто змінюється брегтівський кут ϑ . При даному куті повороту кристала відбивається промінь з певною довжиною хвилі λ . Спектр реєструється за допомогою детектора C , який використовує іонізуючу дію рентгенівського проміння (іонізаційна камера або газорозрядний лічильник). Довжину хвилі λ даної спектральної лінії визначають за формулою Вульфа-Брегга, підставляючи в неї визначені за допомогою спектрометра значення кута ϑ і міжплощинну відстань d для системи площин кристалу.

При дослідженнях важливо визначити форму дифракційних ліній і їх точне положення. Типові дифрактограми наведені на рис. 8.8; 8.9.

При низькотемпературному відпалі холоднодеформованого металу під світловим мікроскопом структурні зміни не виявляються. Лише на рентгенограмах зразків після відпуску спостерігається звуження інтерференційних ліній (див. рис. 8.9), що пов'язано із зняттям мікродеформацій та напруг II роду.

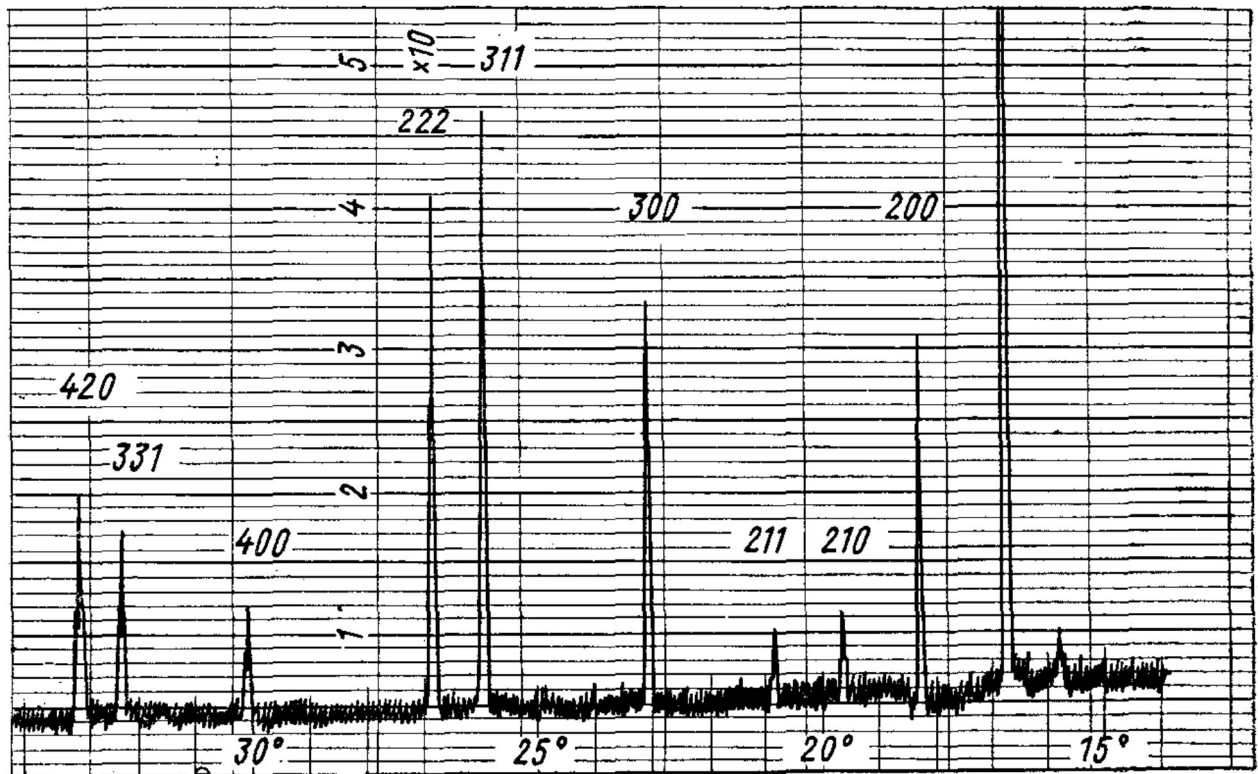


Рисунок 8.8 Типова дифрактограма

У деяких випадках крім звуження ліній на рентгенограмах помітне посилення їх інтенсивності і ослаблення фону рентгенограм. Це говорить про те, що разом із зняттям мікрдеформацій знімаються також статичні спотворення. Для деяких металів зміна ширини ліній і твердості залежно від температури відпалу збігаються. При відпалі ширина ліній спочатку різко зменшується, потім міняється повільно і через деякий час стає постійною (див. рис 8.9) Кінцева ширина ліній досягається тим швидше, чим вища температура відпалу. Проте ширина ліній, властива недеформованому металу, при поверненні повністю не досягається. На рис. 8.10 наведено дані, які свідчать, що інтенсивність ліній на рентгенограмах корелює з властивостями матеріалу. Для визначення напруг другого роду, розміру блоків і щільності дислокацій вимірюють розширення (B) інтерференційних ліній. Для сталей звичайно використовують лінії (110) і (220), заміряні як на досліджуваному зразку так і на еталоні. Ширина інтерференційної лінії еталону повинна бути обумовлена тільки геометричними чинниками. За отриманими профілями інтерференційної лінії від зразка і еталону визначають напівширину ліній.

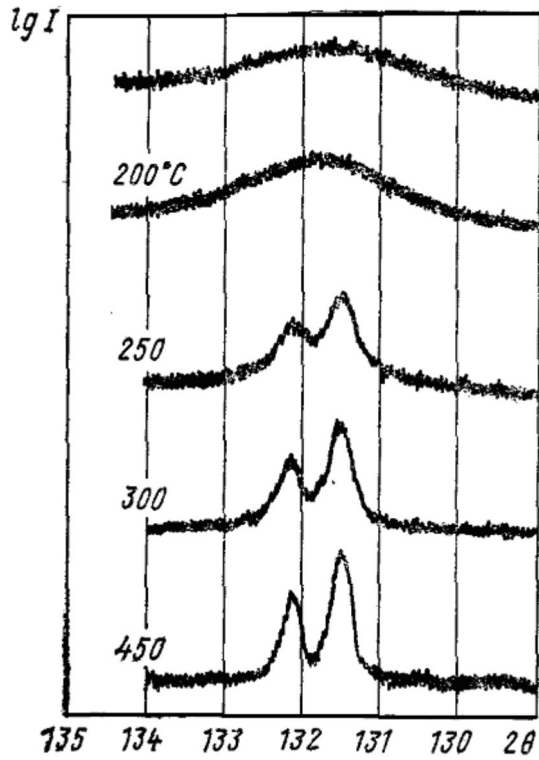


Рисунок 8.9 Зміна ширини лінії (311) холодно деформованої латуні 70 в процесі відпуску (відпал при 200...450° С)

Ширина і форма інтерференційних ліній визначається: розміром кристалів або розбиттям їх на малі розорієнтовані відносно один одного блоки; мікродеформаціями кристалів; наявністю у кристалах дефектів упаковки. Ширина лінії (В) на рентгенограмі:

$$B = S/I_{\max}, \quad (8.3)$$

де, S – площа під кривою інтенсивності; I_{\max} – висота ординати кривої інтенсивності на рентгенограмі.

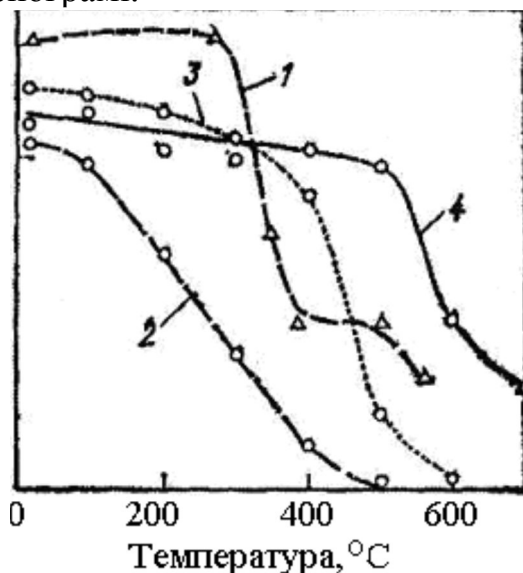


Рисунок 8.10 Зміна властивостей холоднодеформованого заліза у процесі відпуску: 1 – напівширина лінії (220); 2 – електроопір; 3 – швидкість розчинення; 4 – твердість

Метод порошку (полікристалів)

Метод порошку є основним методом дослідження технічних матеріалів і широко застосовується на практиці. Він ґрунтується на дослідженні полікристалічних зразків моно-хроматичним промінням. Зразки використовують у вигляді спресованих (іноді склеєних) із порошку циліндриків діаметром 0,2...0,8 мм або виточених циліндриків, а також плоских пластинок. У результаті взаємодії монохроматичного проміння утворюється інтерференційна картина, яка фіксується на фотоплівці у вигляді кривих, що називаються інтерференційними лініями. Кожна лінія є результатом відбиття від певної серії паралельних атомних площин, розташованих одна від одної на відстані d . При дослідженні застосовуються зразки з полікристалічної речовини або порошку, що складається з великої кількості дрібних ($< 10^{-2}$ мм) кристалів (зерен), що мають довільну орієнтацію у просторі. При освітленні таких зразків монохроматичним або характеристичним рентгенівським випромінюванням виникає виразний інтерференційний ефект у вигляді системи коаксіальних конусів, віссю яких є первинний промінь. Для реєстрації інтерференційної картини у методі порошку використовують декілька способів розташування плівки відносно зразка і первинного пучка рентгенівського проміння: зйомка на плоску, циліндрову і конусну фотоплівку. Реєстрація може проводитися також за допомогою лічильників. Для цієї мети використовують рентгенівські дифрактометри.

Циліндрова фотоплівка. При цьому типі зйомки дифракційні конуси, перетинаючись з фотоплівкою, утворюють криві четвертого порядку (див. рис. 3.11). Окремим випадком такої кривої може бути пряма, яка відповідає куту відбиття $\theta = 45^\circ$. Кут q обчислюється визначенням відстаней між лініями $2l$, що відповідають одному і тому ж інтерференційному конусу, за співвідношенням:

$$2l = 4 \theta R; \theta^\circ = (1/2R) (180^\circ/\pi), \quad (8.4)$$

де R – радіус циліндричної касети з фотоплівкою. На рис. 8.9. зображений звичайний (симетричний) спосіб заряджання плівки. У цьому випадку кінці плівки розташовують поблизу діафрагми, через яку в камеру входить пучок первинного проміння. Для виходу цього пучка з камери в плівці роблять отвір. Недоліком такого способу заряджання є те, що у процесі фото обробки плівка скорочується по довжині, внаслідок чого при розрахунку рентгенограми слід використовувати не значення радіусу R , а деяку величину $R_{\text{эфф}}$. Визначити $R_{\text{эфф}}$ можна шляхом зйомки еталонної речовини з відомими періодами ґраток (наприклад, NaCl). У цьому випадку проводять зворотний розрахунок рентгенограми – за відомими періодами ґратки теоретично визначають кути відбиття q , із значень яких в комбінації з замірами на рентгенограмі відстанями між симетричними лініями визначають величину $R_{\text{эфф}}$.

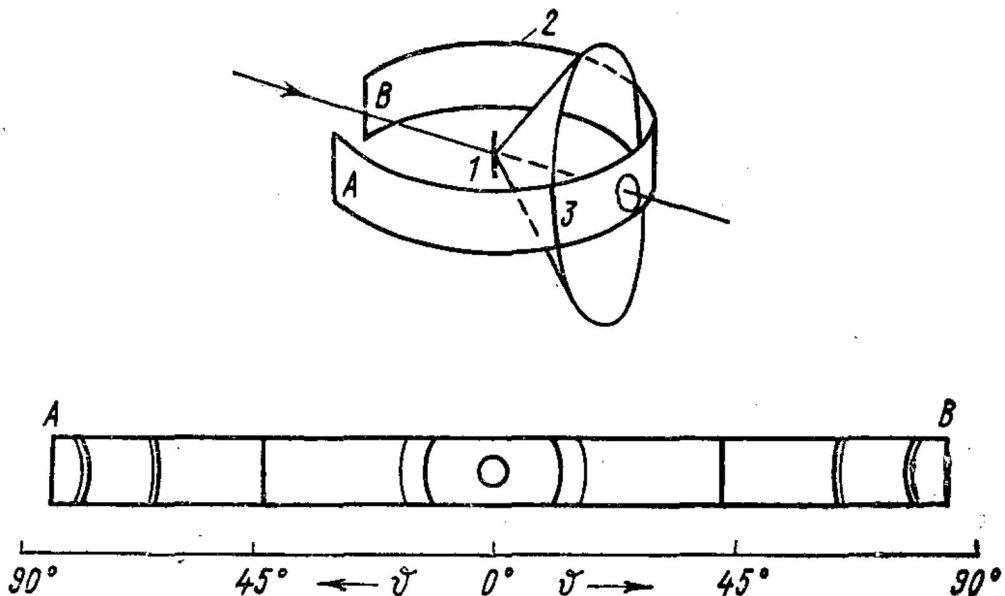


Рисунок 8.11. Зйомка на циліндричну плівку: 1 – зразок; 2 – плівка; 3 – інтерференційна лінія

Промисловістю випускаються дифрактометри УРС-50, ДРОН, ДРД з дистанційним управлінням.

Рентгенівський фазовий аналіз є прямим методом визначення фазового складу, оскільки в його основі лежать характеристики атомної кристалічної будови сплаву. Цей метод особливо доречний у тих випадках, коли хімічний аналіз не дозволяє встановити фазовий склад сплаву. На відміну від рентгеноспектрального аналізу, що визначає, елементи які входять до складу сплаву, фазовий аналіз за рентгенограмами визначає, з яких хімічних сполук складається сплав, оскільки від кожної хімічної сполуки на рентгенограмі виникає свій набір ліній. При проведенні якісного фазового аналізу виміряють відносну інтенсивність інтерференційних ліній і визначають за рентгенограмою міжплощинну відстань. Найсильніші лінії даного сплаву (речовини) називають реперними. За ними і виявляють фази, при цьому часто користуються американською картотекою ASTM, яка має дані, за якими кожна речовина характеризується трьома найсильнішими лініями, а лінія з міжплощинною відстанню d_1 – найінтенсивніша. Картки розташовані за групами, що характеризуються певним інтервалом міжплощинних відстаней на молібденовому випромінюванні.

Основою рентгеноспектрального аналізу є те, що рентгенівський промінь, довжина хвилі якого λ , може відбитися від грані кристалу з міжплощинною відстанню d лише в тому випадку, коли він утворює з гранню кут θ . Його визначають за рівнянням Брегга, в якому $n = 1, 2, 3 \dots$. Для розкладання в спектр пучка рентгенівського проміння необхідно створити такі умови, щоб пучок проміння падав на грань кристалу, що відбиває, під різними кутами. Для цього використовують кристал, який розкладає рентгенівський промінь на спектр, що фіксується на фотоплівці. Перевага цього методу перед іншими (хімічним і спектральним – оптичним) – це визначення елементів, близьких за своїми хімічними властивостях (РЗМ, елементи платинової групи, пари таких елементів, як тантал і ніобій, цирконій і гафній).

Прилади, які використовуються для рентгеноспектрального аналізу, мають назву " Superprob ", MAP тощо.

Метод Оже - спектроскопії (ОЕС) полягає в енергетичному аналізі вторинних Оже-електронів. Ефект Оже (відкритий в 1925 р.) названий на ім'я французького винахідника-фізика П. Оже (Auger). Оже-мікроаналіз дозволяє визначати не тільки вміст елементів на вибраних локальних ділянках поверхні зразків, а також у ряді випадків давати інформацію про хімічний зв'язок елементів за зміною піків на кривих та їх енергетичним положенням. Падаючий первинний електрон збуджує атом. Електрон з внутрішньої (К, L) оболонки переходить на більш високий зовнішній рівень (рис. 8.12). Збуджений атом може повернутися до первинного стану за одним із двох способів:

1. Вибитий електрон повертається з більш високого (зовнішнього) рівня на вакантне місце у внутрішній оболонці атома. При цьому випускається характеристичний рентгенівський фотон (рис. 8.12, а). Вірогідність такого процесу пропорційна квадрату атомного номера (Z^2), тому для легких елементів вона мала.

2. Другий електрон з більш високого (зовнішнього) рівня вилітає з атома (рис. 8.12, б). Цей вторинний електрон і є Оже-електрон. Відносна вірогідність Оже-ефекту вища для легких елементів. Аналіз енергій Оже-електронів, як і аналіз характеристичного рентгенівського випромінювання, дозволяє визначити елементний склад досліджуваних зразків. У методі ОЕС використовується пучок електронів з невеликими енергіями, достатніми для збудження внутрішніх рівнів атомів, що вивчаються. Із зростанням енергії первинного пучка, по-перше, росте вірогідність випуску рентгенівського фотона (для енергій <2 кеВ частка Оже-електронів $>90\%$); по-друге, погіршується вирішення по глибині (збільшується зона збудження). Тому звичайно енергія падаючих електронів знаходиться в інтервалі $0,1 \dots 3$ кеВ.

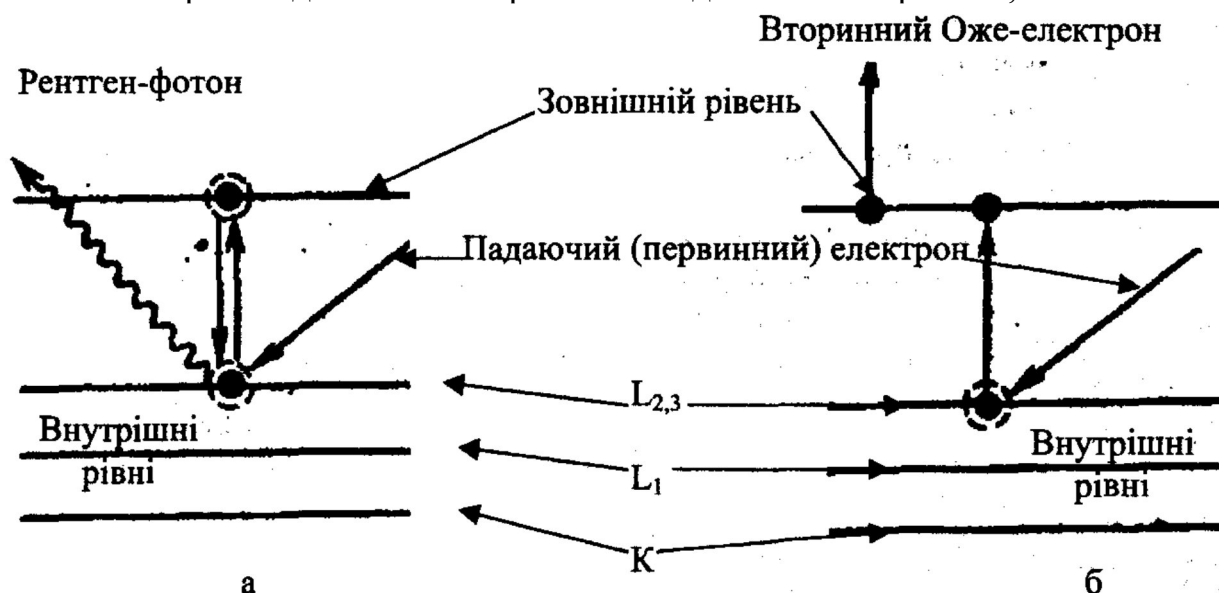


Рисунок 8.12 Схема енергетичних рівнів, що ілюструє виникнення рентгенівських фотонів (а) і Оже-електронів (б): $L_{2,3}$; L_1 , К – електронні оболонки

Отримати такі пучки легко. Складність полягає в тому, щодоводиться вимірювати мале число Оже-електронів на великому фоні розсіяних первинних електронів. На кривій залежності загального числа електронів, що емітуються,

від їх енергії $N(E)$ Оже- спектри дуже слабкі і мало помітні. У 1968 р. американський вчений Р. Харріс запропонував за допомогою порівняно простих електронних пристроїв диференціювати криві $N(E)$ за енергією. Це різко збільшило чутливість методу і дозволило виділити у спектрі сигнал адсорбованих частинок, кількість яких складає близько 1% моноатомного шару. Аналіз поверхні за методом ОЕС обмежується діаметром первинного пучка електронів (у кращих спектрометрах від 5 мкм до 500 Å). Останнім часом метод ОЕС став одним з найпоширеніших методів аналізу. Переваги методу: висока чутливість аналізу у приповерхневому шарі (5...30 Å), швидке отримання спектру і можливість виявлення всіх елементів з $Z > 2$. Оже-спектр дає кількісну інформацію про склад приповерхневого шару, в деяких випадках – відомості про хімічні зв'язки атомів в ньому, а в поєднанні з іонним травленням дозволяє отримати профілі розподілу елементів за глибиною.

У сучасних Оже-мікрозондах досягається локальність аналізу на поверхні до 0,05...0,1 мкм при глибині аналізу 0,3...2 нм. Іонне травлення дозволяє одержувати пошарові профілі розподілу елементів у поверхневих шарах товщиною до 0,1...0,2 мкм. Принциповий пристрій Оже-електронного спектрометра наведено на рис. 8.13, а Оже-спектри на рис. 8.14. Вторинні електрони проходять крізь сітку в простір між двома коаксіальними циліндрами (рис. 8.13). Внутрішній циліндр і мішень заземлені, а на зовнішній циліндр поданий негативний потенціал V_a . Електрони, що покидають зразок-мішень з енергією eV_e , фокусуються на рівні вихідних щілин аналізатора; відношення V_a/V_e залежить від геометрії установки коаксіальних циліндрів. Електронний помножувач розміщується позаду вихідної щілини аналізатора. Дані записуються у вигляді кривої розподілу Оже-електронів за енергіями $N(E)$. Проте записуваний при цьому сигнал надто слабкий і супроводжується значним фоном. З метою підвищення відношення сигнал – шум використовується синхронний детектор для обчислення похідної сигналу $N(E)$ за енергією E .

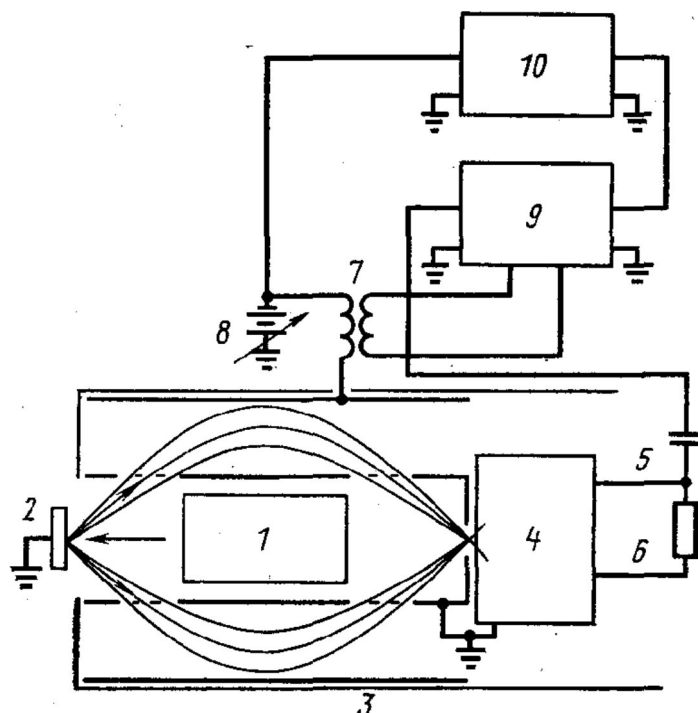


Рисунок 8.13 Принциповий пристрій Оже-електронного спектрометра: 1 – електронна гармата; 2 – зразок-мішень; 3 – коаксіальний циліндровий аналізатор; 4 – електронний

помножувач; 5 – колектор; 6 – кінцевий діод; 7 – ізолюючий трансформатор; 8 – скануюча напруга; 9 – синхронний детектор; 10 – двохкоординатний потенціометр

У відсутність Оже-піку варіації $N(E)$ за енергією відносно малі. В той же час слабкі Оже-піки («сплески» на кривій $N(E)$) на графіку похідної функції $dN(E)/dE$ даватимуть значно помітні гострі піки. Оже-спектрометр розміщують у камері, де створюється високий вакуум: 10...6 мм рт. ст. для пасивних і 10...10 мм рт. ст. для особливо активних поверхонь; це розрідження дозволяє уникнути серйозного забруднення зразка. Вакуумна система може складатися з насосів форвакуумного ротаційного; турбомолекулярного; криогенного на рідкому азоті і титанового сублімаційного.

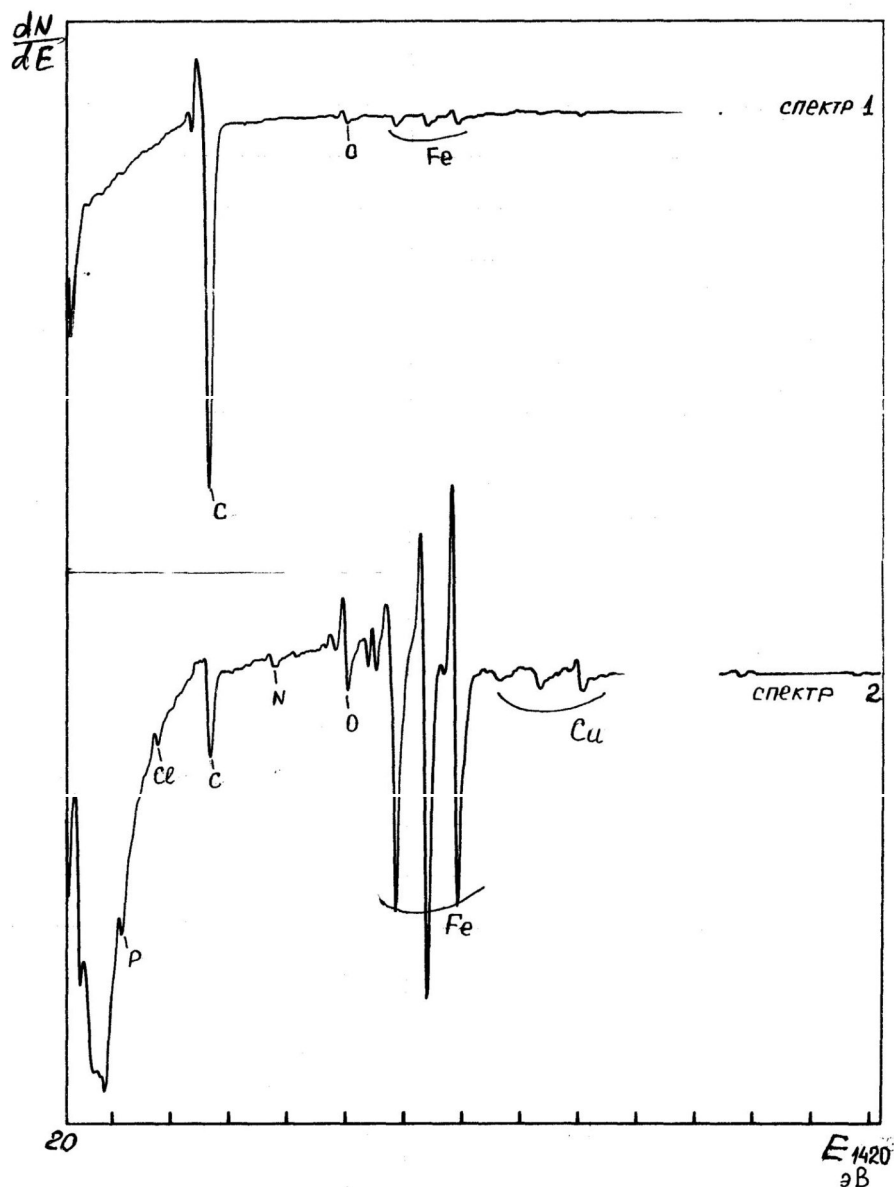


Рисунок 8.14 Оже-спектри чавуну

Крім утримувача зразка і аналізатора, в камеру приладу поміщають іонну гармату для очищення поверхні зразка та іонного травлення (ерозії) його з контрольованою швидкістю для вивчення змін хімічного складу за глибиною зразка (у міру справлення шару). Прилад також забезпечений пристроями для руйнування зразка у вакуумі при зниженій температурі, спектрометром для аналізу залишкових газів, приставкою для нагрівання зразка у вакуумі.

4. Ділатометричний аналіз

Ділатометричний аналіз застосовують для визначення коефіцієнта лінійного розширення і критичних точок сталей і сплавів. При ділатометричному аналізі визначають зміну довжини зразка при нагріванні і охолодженні або при ізотермічній витримці, а також коефіцієнт теплового розширення у заданому інтервалі температур. Зміна довжини зразка характеризує об'ємні зміни сплаву. Важливою перевагою ділатометричного аналізу є незалежність об'ємного ефекту, а отже, і точність аналізу від швидкості охолодження. Крім того, прилади для визначення лінійних змін зразків – ділатометри – відрізняються дуже малою інерційністю. Крім пристрою для спостереження або запису лінійних змін, у ділатометрі повинен бути температурний контроль, оскільки при дослідженні в металознавстві важливо визначити не тільки величину об'ємних змін, а й температури, при якій відбуваються ці зміни. Із цих причин ділатометричний аналіз застосовують для визначення критичних точок перетворень у сталі, для вивчення процесів гартування і відпуску сталі, а також для дослідження графітизації чавуну і процесів старіння деяких сплавів. Проте основне застосування цей метод отримав для вивчення перетворень у сталі, оскільки більшість з них супроводжується більш різкою зміною об'єму, ніж інших властивостей. Так, наприклад, перехід α -заліза (питомий об'єм $V = 0,127\text{см}^3/\text{г}$) у γ -залізо (питомий об'єм $V = 0,122\text{см}^3/\text{г}$) або перліту в аустеніт супроводжується помітним скороченням об'єму (і довжини зразка), оскільки γ -залізо і твердий розчин вуглецю на його основі (аустеніт) володіють якнайменшим питомим об'ємом. Зворотний перебіг цих перетворень при охолодженні і особливо перехід аустеніту в мартенсит супроводжується значним збільшенням об'єму зразка, оскільки мартенсит має найбільший питомий об'єм ($V = 0,131\text{см}^3/\text{г}$ при $C=1,4\%$).

ТЕМА № 9 Вуглецеві сталі. Класифікація, маркування та використання

Сталю називається залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 0,025 до 2,14%. Сталі промислового виробництва, крім заліза і вуглецю, у своєму складі містять певну кількість домішок інших елементів. Це зумовлено технологією виробництва сталі (наприклад, Mn до 0,9%, Si до 0,35% для розкислення), неможливістю їх повного видалення (S та P до 0,05%; O, N, H), а також присутністю в вихідних матеріалах шихти (Cr, Ni, Cu тощо).

Домішки також поділяють на постійні (Si, Mn, S, P), приховані (N, O, H), випадкові (Cu, Al, W, Ni) і спеціальні (вуглець і легуючі елементи).

Вуглецеві сталі, їх склад, структура і властивості залежно від вмісту постійних домішок.

Вуглецеві сталі поряд із вуглецем містять до 0,9% Mn, 0,35% Si, а також до 0,05% S і P як постійних домішок. Основним компонентом, який визначає будову та властивості вуглецевих сталей, є вуглець. Із збільшенням його вмісту в сталі утворюється більше твердої складової – цементиту, тому сталь стає міцнішою і твердішою, проте менш пластичною.

Марганець і кремній у цих кількостях є корисними домішками. Розчиняючись у фериті, вони зміцнюють його, підвищуючи міцність сталі.

Сірка та фосфор містяться в сталі як наслідок доменного виробництва і є шкідливими домішками. При виробництві сталі в мартенах та електричних печах вміст сірки та фосфору доводять до потрібної кількості.

Сірка розчиняється в залізі до 0,06% і утворює із залізом легкоплавку евтектику Fe-FeS (t плавлення 988°C), яка надає сталі червоноламкості - підвищує її крихкість при температурах гарячої обробки. Оскільки сірка в сталі знаходиться у вигляді евтектики FeS на границях зерен фериту, то при обробці тиском при температурі від 800 до 1100...1200 °C у цих місцях матиме місце крихке руйнування.

Фосфор частково до 1,2% розчиняється у фериті, а інша частина утворює хімічну сполуку – фосфід заліза Fe₃P. Фосфор надає сталі холодноламкості, тобто підвищує її крихкість при нормальній і, особливо, при пониженій температурі. У зв'язку з цим вміст сірки та фосфору в сталі суворо обмежують. Вміст S та P є одним з показників якості сталі. Крім сірки та фосфору сталь містить такі домішки як кисень, азот та водень. Залежно від способу виробництва їх вміст може бути в межах 0,0001...0,1 % (табл. 9.1).

Таблиця 9.1 – Вміст водню, азоту та кисню (%) у сталі при різних способах виробництва

Газ	Спосіб виробництва сталі			
	електросталь	мартенівський основний	киснево - конверторний	бесемерівський
Водень	0,0002...0,0006	0,0002...0,0006	0,0001...0,0003	0,0004...0,0007
Азот	0,008...0,010	0,004...0,006	0,001...0,003	0,010...0,014
Кисень	0,01...0,02	0,02...0,04	0,02...0,04	0,04...0,10

Кисень і азот знаходяться в сплавах у вигляді оксидів і нітридів, які в більшості знаходяться на границях зерен і надають крихкості сталі, тобто зменшують її пластичність. Водень не розчиняється у фериті і не утворює хімічних сполук. Але при швидкому охолодженні після гарячої обробки в інтервалі температур 200-20 °С у масивних деталях (товщина стінки більше 30 мм) він виходить на поверхню і утворює надриви (флокени) (рис. 9.1).

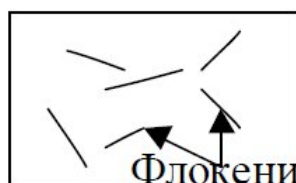


Рисунок 9.1 Флокени

Мікроструктура вуглецевих сталей у стані рівноваги, отримана після оптимального нагрівання і повільного охолодження (відпалу), може бути визначена за діаграмою стану залізо-вуглець. За структурою у стані рівноваги сталі поділяються на *доевтектоїдні* (менше 0,8%С), *евтектоїдні* (0,8%С) та *заевтектоїдні* (від 0,8 до 2,14%С) (рис. 9.2).

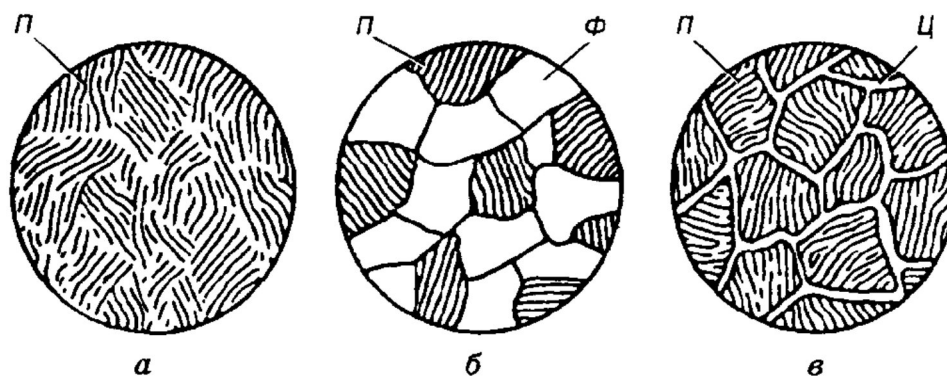


Рисунок 9.2 Мікроструктура сталей залежно від вмісту вуглецю: а – евтектоїдні (С = 0,8%); б – доевтектоїдні (С < 0,8%); в – заевтектоїдні (С від 0,8 до 2,14%); П – перліт; Ф – ферит; Ц – цементит

Доевтектоїдні сталі мають структуру фериту (світлі зерна) і перліту (темні зерна) (рис. 9.2, б). Із збільшенням вмісту вуглецю кількість перліту зростає, а фериту зменшується. У доевтектоїдній сталі перліт у більшості випадків має пластинчасту будову. Будову перліту у вигляді пластин фериту і цементиту, що чергуються, можна чітко розрізнити при збільшеннях 500 раз. Щоб розрізнити цементит і ферит, сталь травлять розчином пікрату натрію, який зафарбує цементит у темний колір. За структурою доевтектоїдної сталі визначають вміст вуглецю за формулою:

$$C = (F_{\text{П}} \times 0,8) / 100, \% \quad (9.1)$$

де $F_{\text{П}}$ - площа, зайнята перлітом.

Структура евтектоїдної сталі - перліт (рис. 9.2, а). Розрізняють перліт пластинчастий (ферит і цементит мають форму пластинок) і зернистий, у якому цементит має форму дрібних зерен, розміщених у фериті. Зернистий перліт більш пластичний і має меншу твердість (пластинчастий перліт – 160...220 НВ;

зернистий – 12...150 НВ). Він утворюється в результаті часткового розчинення пластин цементиту та виділення на них кульок, наприклад, під час кування при температурі виділення вторинного цементиту або при дуже повільному охолодженні або при дуже великій тривалості процесу охолодження (50...100 год при 650°C). Із зменшенням розміру цементитних пластин або кульок твердість і міцність перліту зростає. Заевтектоїдна сталь має структуру перліту і вторинного цементиту. Цементит може бути у вигляді зерен або світлої сітки навколо зерен перліту (рис. 9.2, в). Вміст вуглецю в заевтектоїдній сталі можна розрахувати за формулою:

$$C = (F_{п} \times C_{п} + F_{ц} \times C_{ц}) / 100, \quad (9.2)$$

де $F_{п}$, $F_{ц}$ – відповідно площа, зайнята перлітом та цементитом, %;

$C_{п}$, $C_{ц}$ – відповідно вміст вуглецю у перліті ($C = 0,8\%$) та цементиті ($C = 6,67\%$).

Наприклад, для рис. 9.2 в:

$$C = ((97,96) \times 0,8 + (3,4) \times 6,67) / 100 = 0,98, 1,03 \%. \quad (9.3)$$

Максимальний вміст вуглецю в заевтектоїдній сталі до 1,5%, оскільки при більшому вмісті вуглецю сталь стає дуже крихкою.

Величина, форма і розміщення зерен у сталі – фактори, які впливають на їх властивості. З укрупненням зерен знижується ударна в'язкість, твердість тощо властивості. Виділення вторинного цементиту у вигляді сітки по межах зерен перліту свідчить про закінчення гарячої обробки тиском при високій температурі або проведення відпалування при дуже високих температурах нагрівання. Це дефект заевтектоїдної сталі, який погіршує її міцність і в'язкість. Із збільшенням вмісту вуглецю у заевтектоїдній сталі цементитна сітка ширша.

Форма цементитних пластин впливає на оброблюваність сталі різанням. Доевтектоїдна сталь добре обробляється різанням при структурі пластинчастого перліту, а евтектоїдна і заевтектоїдна – зернистого. Величина зерен сталі характеризується номером за стандартною шкалою. Сталь з зерном номерів 1...4 (0,222÷0,0788 мм) вважається крупнозернистою, а 5...8 (0,0553÷0,0196 мм) – дрібнозернистою. Для визначення зернистості сталі її структуру порівнюють при збільшенні у 100 разів зі стандартною шкалою структури. При цьому визначають, якому номеру зерна стандартної шкали відповідають зерна, які переважають у зразку.

Властивості сталі залежать від вмісту вуглецю, структури, способу отримання і наявності домішок. Механічні властивості залізобуглецевих сплавів змінюються залежно від виду і кількості структурних складових, їх форми, величини і розміщення. Відповідно до збільшення вмісту вуглецю у сталях, що перебувають у рівноважному стані, змінюється їх структура і фазовий склад; зменшується кількість м'якого фериту (80 НВ); зростає кількість перліту і твердого цементиту (800 НВ), твердість і поріг міцності; знижуються ударна в'язкість і пластичні характеристики (рис. 9.3). При вмісті C більше 1,0 % поріг міцності знижується, що зумовлено утворенням суцільної сітки цементиту по границях зерен сталі.

Якість сталі залежить від вмісту сірки та фосфору: сталі звичайної якості – $S < 0,06\%$, $P < 0,05\%$; якісні сталі - $S < 0,040\%$, $P < 0,040\%$, високо якісні сталі – $S < 0,030\%$, $P < 0,030\%$.

Класифікація та маркування вуглецевих сталей:

1. *За способом виробництва:* конвертерні (бесемерівські, томасівські, кисневі), мартенівські, електропічні;
2. *За вмістом вуглецю:*
 - низьковуглецеві ($C \leq 0,25\%$);
 - середньовуглецеві ($C = 0,25-0,7\%$; $\approx 20\%$ фериту та 80% перлиту);
 - високовуглецеві ($C \geq 0,7\%$).

3. *За якістю:*

1. Сталі звичайної якості містять до $0,06\%$ S; $0,05\%$ P.

Сталі звичайної якості маркуються літерами Ст і цифрами від 0 до 6 (умовний номер марки сталі). Більше число відповідає більшому вмісту вуглецю, підвищенню міцності і зниженню пластичності. Поруч з номером марки вказують ступінь розкислення сталі: кп – кипляча сталь, пс – напівспокійна сталь, сп – спокійна сталь.

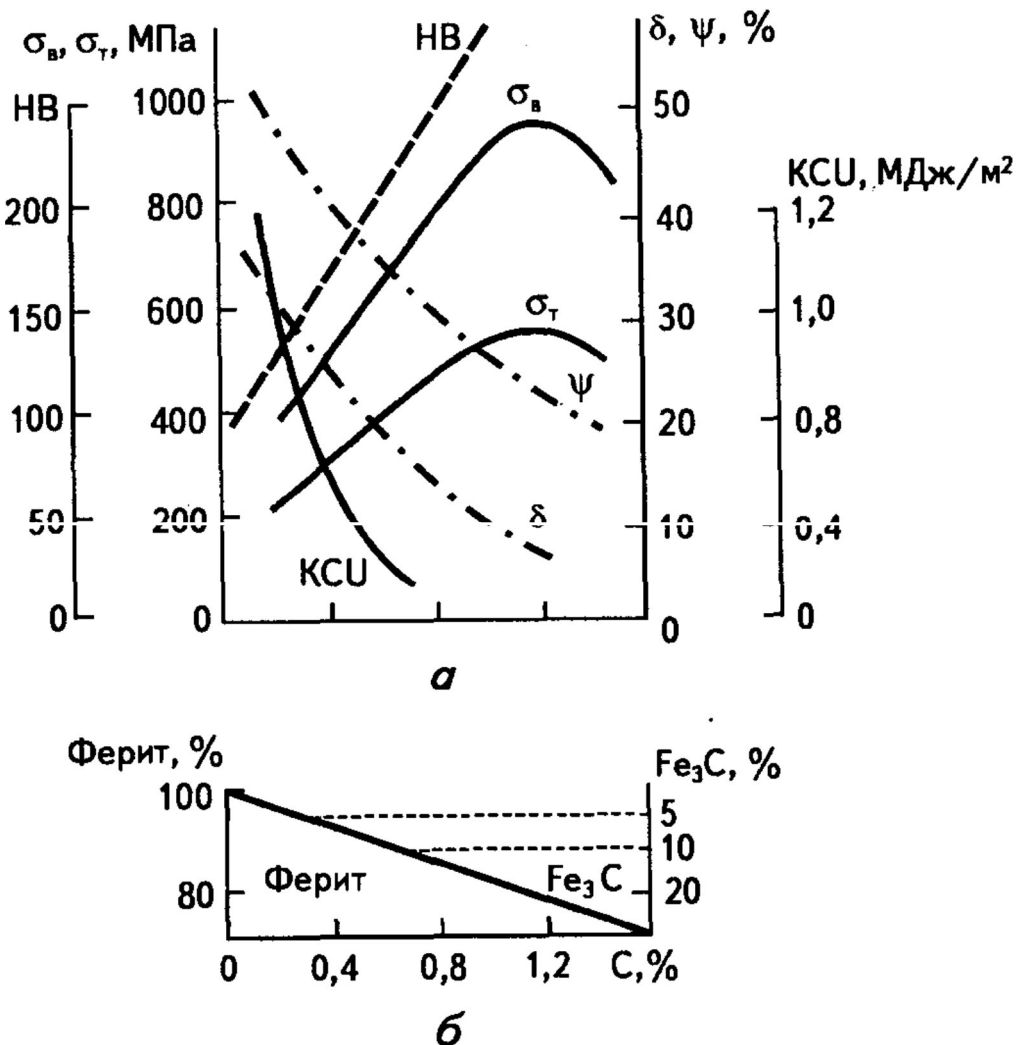


Рисунок 9.3 Вплив вуглецю на механічні властивості сталі (а) та на кількість фериту і цементиту (б)

Сталі звичайної якості діляться на три групи: А, Б, В. Група А – сталі постачаються з гарантованими механічними властивостями та використовуються в такому стані, в якому їх виготовив металургійний завод. Марки – від Ст.0 до Ст.6. Літера А в марках групи не ставиться. Група Б – сталі постачаються з гарантованим хімічним складом, піддаються термічній обробці і

гарячій обробці тиском (ковка, штампування). Марки – БСт1кп; БСт3пс до БСт6сп, МСт3 – мартенівська, КСт6 – конвертерна тощо. Група В – сталі постачаються з гарантованими механічними властивостями та хімічним складом. Марки – ВСт1 до ВСт6. Кращі сталі групи В. Гірші – групи А. Наприклад, Сталь БСт0кп. Ст – сталь звичайної якості, постачається з гарантованим хімічним складом, кипляча, 0 – порядковий номер. Із збільшення величини порядкового номеру вміст вуглецю зростає, але ця цифра не означає вмісту вуглецю в сталі.

2. Якісні сталі містять $S < 0,040\%$ і $P < 0,040\%$. Маркуються цифрами від 05, 08, 10, 15 30 – до 85 тощо. Цифри в марках сталей визначають вміст вуглецю в сотих частинах відсотка. Наприклад, сталь 45 – $C \approx 0,45\%$.

Якісні вуглецеві сталі використовують для виготовлення:

Сталь 05; 08; 10 – каністр, діжок, кузовів автомобілів, місткостей, дроту, катанки.

Сталь 15; 20; 25 – деталей, які піддають хіміко – термічній обробці (цементация, нітроцементация тощо). Шестерні, пальці, вали, осі, кулачки, поршневі пальці зміцнюють тільки поверхневий шар з сталей 40...55.

Сталі 40, 45, 50, 55 – шатунів, валів, осей та інших деталей, які працюють в умовах складних схем навантаження.

Сталь 60; 65; 70 – пружин, ресор, робочих органів ґрунтообробних машин (борона, плуг, лапа культиватора, лопата, сапка тощо).

3. Високоякісні сталі містять S і $P < 0,030\%$ та мають літеру А у кінці марки.

Наприклад, Сталь 20А – $C = 0,17...0,24\%$, $Mn = 0,35...0,65\%$, $Si = 0,17...0,37\%$, $S < 0,030\%$, $P < 0,030\%$. Використовують після нормалізації для виготовлення гаків кранів та муфт, після хіміко-термічної обробки – шестерні, пальці, вали тощо.

4. За методом придання форми та розмірів сталі можуть бути: Литі – сталі фасонне литво (після цифр у марці сталі ставиться літера Л). Наприклад, Сталь 15Л...55Л.

Ковані – поковки вільної ковки та штампові.

Прокатані – прокат різного профілю (пруток, стрічка, лист, дріт, спеціальні профілі).

5. За структурою: доєвтектоїдні (ферит + перліт), евтектоїдні (перліт), заєвтектоїдні (перліт + цементит).

6. За призначенням: конструкційні (до 0,7 % С), інструментальні (0,7...1,35 % С), автоматні та котельні.

Конструкційні сталі поділяються на машинобудівельні та будівельні. Конструкційні машинобудівельні сталі, як правило, якісні та високоякісні. Конструкційні будівельні сталі, як правило, звичайної якості.

Вуглецеві інструментальні сталі, їх маркування та призначення.

Вуглецеві інструментальні сталі містять від 0,7 до 1,35 % С. Вони мають структуру при $C < 0,8\%$ - ферит + перліт; при $C = 0,8\%$ - перліт; при $C > 0,8\%$ - перліт + цементит.

Інструментальні сталі маркують У7, У7А, У8, У8А до У13, У13А.

Буква У – вуглецева. Число після У – середній вміст вуглецю в десятих частинах відсотка, буква А — сталь високоякісна. Наприклад: Сталь У7 - С = 0,65 - 0,73%; Мп = 0,17 - 0,28%; Si = 0,17 - 0,33%; S < 0,028%; P < 0,03%; Сталь У7А – вміст С, Мп, Si як у попередньої, а S<0,018%, P<0,025%. Інструментальні сталі використовують для виготовлення:

Сталь У7, У8 – ударного слюсарного інструменту (молотків, зубила, крейцмесера, воротка, пробійника, накувальні, а також інструменту для обробки деревини (стамески, рубанка). Зі сталей У9, У10 виготовляють різці, свердла по дереву, плашки, мітчики. Зі сталей У12, У13 виготовляють ножовочні полотна, граверний інструмент, напилки, ножиці, кобценьки.

Автоматні сталі – це сталі, з яких виготовляють деталі на верстатах-автоматах. Стружка повинна бути крихкою. Для цього сталі спеціально легують сіркою (0,15...0,30%) та фосфором (0,05...0,15%). Крім того, ці сталі можуть бути леговані свинцем і селеном. Їх маркують буквою А, що стоїть на початку марки та цифрами, що вказують на вміст вуглецю в сотих частинах відсотка.

Наприклад: Сталь А11; А12; А20; А30Г; АС30; А35Е. Г - марганець; С – свинець; Е – селен.

Котельні сталі – це сталі для котлів, посудин високого тиску, парових котлів, камер горіння, судових топок, газових турбін тощо, які повинні працювати при високому тиску і температурі від -40 до 450 °С та добре зварюватись. Для забезпечення таких властивостей до їх складу додають титан і додатково розкислюють алюмінієм. Вуглецеві котельні сталі маркують цифрою, яка вказує на вміст вуглецю в сотих частинах відсотка та буквою К, яка означає, що сталь котельна. Наприклад: Сталь 12К; 15К; 16К; 18К; 20К і 22К з вмістом вуглецю від 0,08 до 0,26%, Si – 0,17 - 0,40%, Мп-0,35 - 1,0%, S < 0,04%, P < 0,04%. Виробляють у вигляді листа завтовшки до 200 мм.

ТЕМА № 10 **Машинобудівні чавуни. Структура, властивості та використання**

Залізвуглецеві сплави з вмістом вуглецю від 2,14 до 6,67 % називаються чавунами. Чавуни порівняно із сталями мають більш високий вміст вуглецю, постійних домішок (S, P, Si, Mn), більш низькі механічні властивості. Завдяки добрим технологічним властивостям (ливарні, оброблюваність різанням, стійкість проти зношування, антифрикційні тощо) чавун широко використовують для виготовлення різних деталей сільськогосподарської техніки.

За станом вуглецю у чавунах вони поділяються на дві групи:

а) білі, в яких вуглець знаходиться у хімічно зв'язаному стані (у вигляді цементиту – Fe_3C);

б) сірі, ковкі та високоміцні – в яких весь вуглець чи більша його частина знаходиться у вільному стані у вигляді графіту. Частково може бути у вигляді цементиту – Fe_3C ;

в) леговані чавуни зі спеціальними властивостями.

Білі чавуни дуже тверді та крихкі і мають білий блискучий злам. Вони кристалізуються за метастабільною (цементитною) діаграмою Fe- Fe_3C . За структурою білі чавуни поділяються на доевтектичні, евтектичні та заевтектичні. Доевтектичні (C від 2,14 до 4,3 %) чавуни мають структуру перліту, ледебуриту і вторинного цементиту (рис. 10.4, б). Перліт під мікроскопом видно у вигляді темних ділянок, а ледебурит – у вигляді ділянок з рівномірно розміщеними темними (заокругленими чи витягнутими) зернами перліту у білій цементитній основі. Цементит – білі зерна.

Евтектичний чавун (4,3 % C має структуру ледебуриту у вигляді рівномірно розміщених темних зерен перліту на білому фоні цементиту (рис. 10.1 а).

Заевтектичний чавун (C від 4,3 до 6,67 %) має дві структурні складові – ледебурит і цементит (у формі витягнутих зерен, рис. 10.1, в).

Оскільки цементит і ледебурит дуже тверді та малопластичні структурні складові, то білі чавуни тверді, крихкі і погано обробляються різанням. Білі чавуни рідко застосовуються у машинобудуванні. Вони переважно йдуть на переробку в сталь та для отримання ковкого чавуну. Сірі, ковкі та високоміцні чавуни мають структуру металевої основи сталі з графітовими включеннями (рис. 10.2). За структурою вони відрізняються лише формою графітових включень. У сірих чавунів графіт має пластинчасту форму (рис. 10.3, а), у ковких – пластівцеву (рис. 10.3, б), у високоміцних – кулясту (рис. 10.3, в). Структура металевої основи цих чавунів може бути: феритна (рис. 10.3, д), перлітна (рис. 10.3, г), феритно-перлітна (рис. 10.3, є). Вона визначається кількістю вуглецю, який знаходиться у хімічно зв'язаному вигляді (Fe_3C). Від структури металевої основи залежать границя міцності на стискання, твердість та стійкість проти зношування. Пластичність, опір розтягу і стійкість проти зношування залежать, головним чином, від форми, розмірів, кількості та характеру розміщення графітових включень.

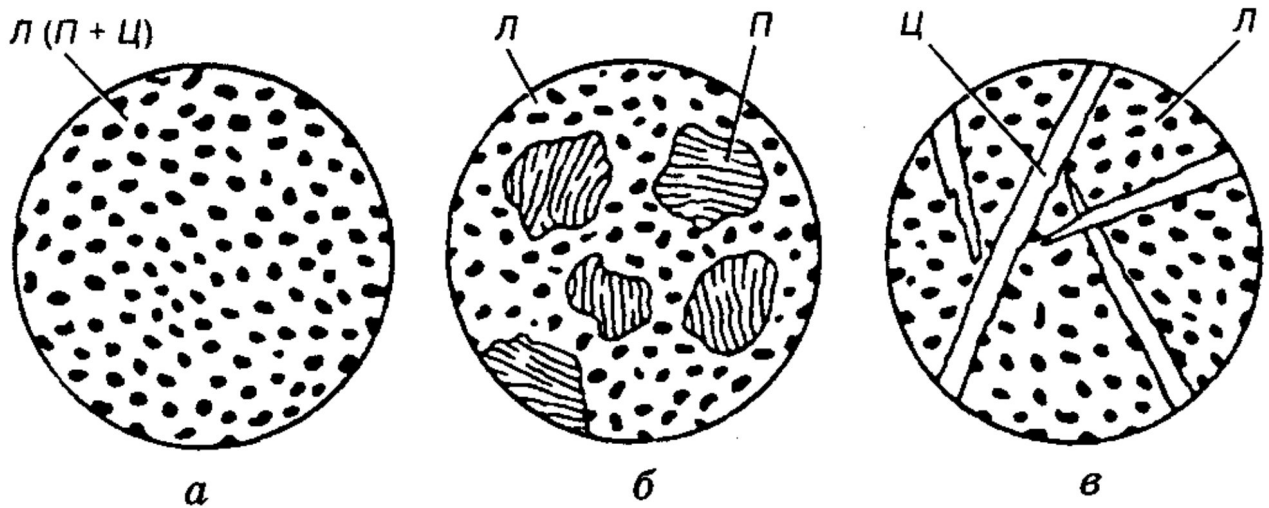


Рисунок 10.1 Мікроструктура білих чавунів: а – евтектичного; б – доевтектичного; в – заевтектичного (х 500); П – перліт; Ц – цементит; Л – ледебурит

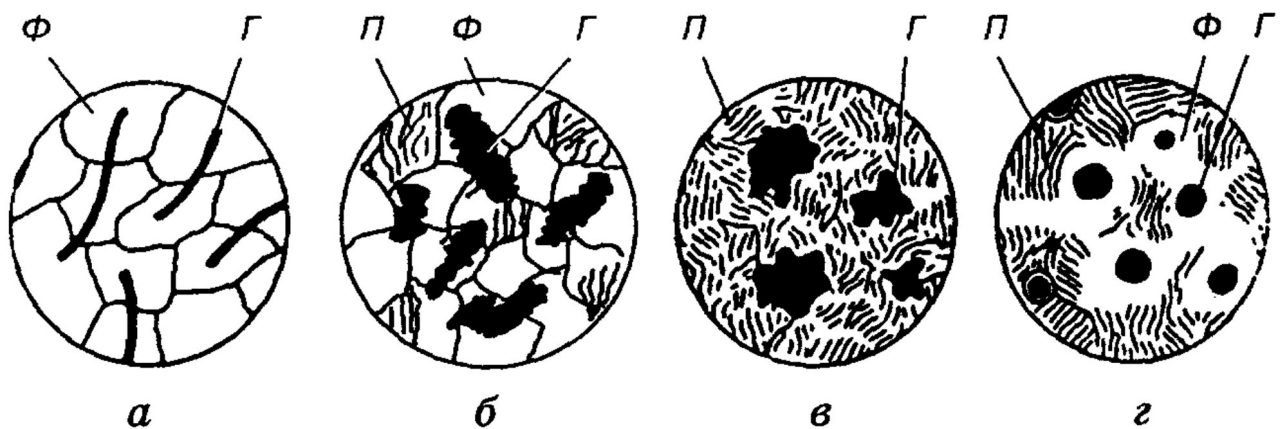
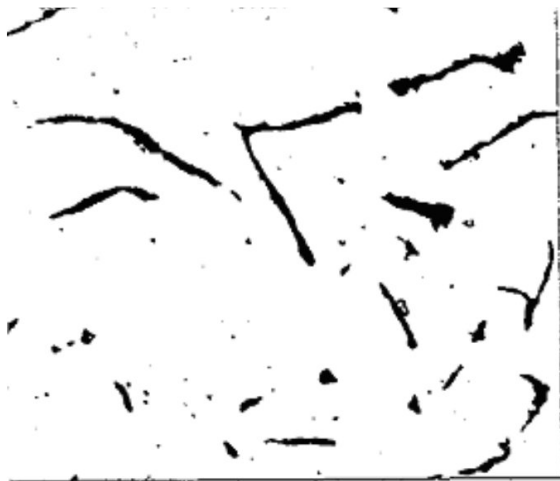
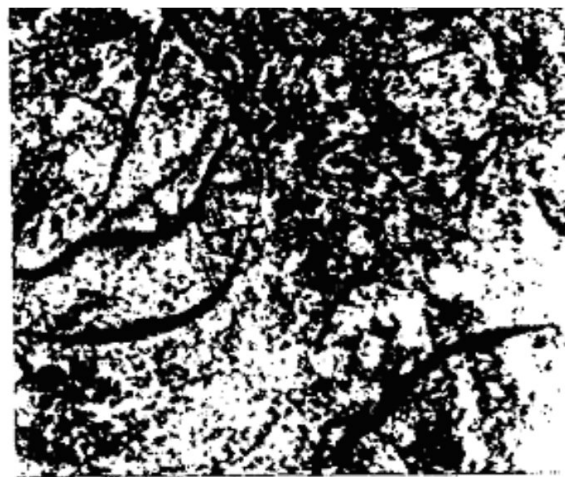


Рисунок 10.2 Структура металевої основи сталі з графітовими включеннями пластинчастої (а), вермикулярної (б), пластівчастої (в) і кулястої (г) форми: Ф – ферит; Г – графіт; П – перліт

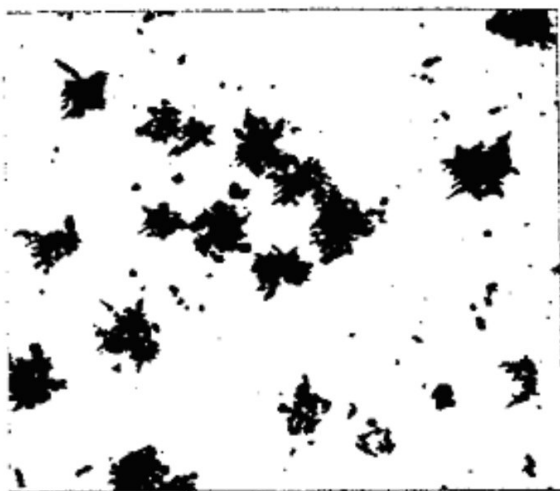
Графіт має дуже малу міцність порівняно з металевою основою. Тому його наявність рівносильна порожнинам чи тріщинам, що створює концентрацію напружень. Чим більш заокруглені дрібні і рівномірно розміщені графітові включення, тим міцніший та пластичніший чавун. Сірі чавуни дуже крихкі та менш міцні, ніж ковкі та високоміцні чавуни завдяки пластинам графіту. Ці пластини розглядають як тріщини (надрізи), які створюють концентрацію напружень у металевій основі сірих чавунів (рис. 10.3, г). Наявність графіту у чавунах підвищує їх стійкість проти зношування і здатність поглинати вібрації. Отриманню сірого чавуну сприяє підвищення кількості вуглецю та кремнію, сповільнене охолодження та зменшений вміст марганцю.



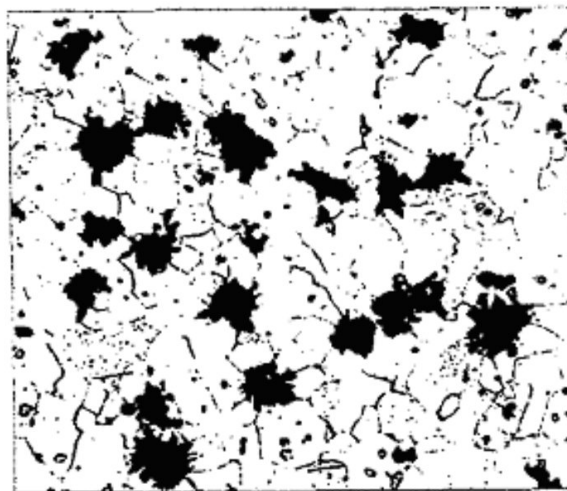
a



г



б



д



в

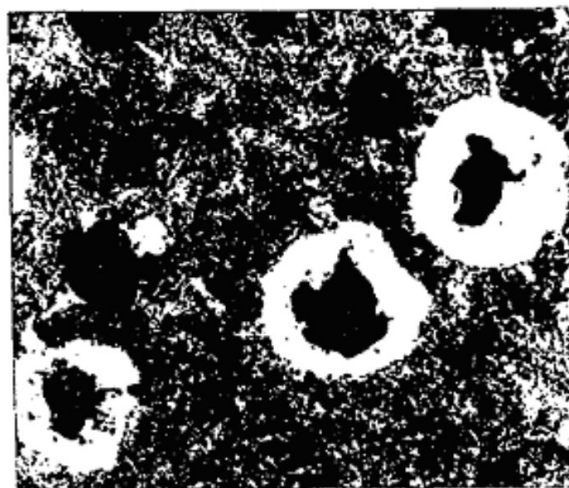


Рисунок 10.3 Форма графіту (а, б, в) та мікроструктура чавунів (г, д, е): а – пластинчаста; б – пластівцева; в – куляста; г – сірий чавун перлітний; д – ковкий чавун феритний; е – високоміцний чавун ферито-перлітний

Підвищення механічних властивостей сірих чавунів досягаються модифікуванням їх силікокальцієм, феросиліцієм, вторинним алюмінієм. Модифікатори вводяться в сірий чавун перед його розливанням. Модифікатори

утворюють тугоплавкі оксиди типу SiO_2 , CaO . Ці оксиди є додатковими центрами графітизації і сприяють подрібненню графіту.

Процеси графітизації в чавунах. Характерною структурною особливістю сірих, ковких та високоміцних чавунів є вкраплення графіту в металевій основі. Порівняно з основою міцність і пластичність графіту дуже малі. Графітизацією називається виділення графіту з рідкого й твердого розчинів, а також з цементиту. Графіт є однією з модифікацій вуглецю. У залізовуглецевих стопах графіт, як і цементит, може перебувати в рівновазі з рідким розчином, аустенітом та феритом. Залежно від термодинамічних і кінетичних умов кристалізації у чавунах формується графіт або цементит. Зазначимо, що за концентрацією вуглецю аустеніт (до 2,14 % C) і рідкий розчин (2,14...6,67 % C) ближчі до цементиту (6,67 % C), ніж до графіту (100 % C). Зважаючи на важливу роль дифузійних процесів під час формування цементиту й графіту, утворення цементиту вірогідніше, оскільки для його формування потрібні менші сумарні переміщення атомів заліза й вуглецю, ніж для утворення графіту. З іншого боку вільна енергія суміші аустеніт + цементит вища, ніж суміші аустеніт + графіт, тобто утворення графіту знижує вільну енергію системи. Тому під час тривалого нагрівання з цементиту виділяється графіт. Отже, порівняно з цементитом графіт – стабільніша фаза.

Оскільки для виділення з твердого розчину графіту необхідна значна інтенсифікація дифузійних процесів (при $t = 950 \dots 1060$ °C, $t = 13 \dots 90$ годин має місце наступна реакція $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$), збільшення швидкості охолодження чавуну буде гальмувати ці процеси, створюючи сприятливі умови для утворення метастабільної фази – цементиту. Перетворення, що відбуваються під час графітизації чавуну, можна простежити за діаграмою стабільної рівноваги залізо - графіт (штрихові лінії). Для порівняння суцільними лініями показана діаграма метастабільної рівноваги залізо – вуглець.

Кристали графіту мають вигляд пелюсток, що виходять з одного центру. Вторинний графіт та графіт евтектоїду, як правило, виділяється на утвореннях первинного й евтектичного графіту. Утворення графіту є важливою складовою частиною процесу формування структури чавунів. Залежно від температурних і фазових умов утворення графіту в чавуні структурно розрізняють:

1 Первинний графіт, що утворюється у процесі кристалізації з рідкого стану;

2 Евтектичний графіт, що утворюється при евтектичній кристалізації за схемою Рідина \rightarrow Аустеніт + Графіт

3 Вторинний графіт, що утворюється протягом охолодження чи ізотермічної витримки чавуну у твердому стані.

Первинний графіт кристалізується в заевтектичних чавунах у рідкій фазі без будь-яких перешкод з боку інших фаз. Вільний ріст виділень визначає різноманіття форм первинного графіту: пластинчаста (розеточна), завихрена компактна, куляста (глобулярна). Зародками графіту можуть бути тугоплавкі неметалеві включення, що задовольняють принципу структурної і розмірної відповідності (модифікатори I роду). До них належать деякі окисли, сульфідні і нітриди. Методами стереометричної металографії встановлено, що первинний

графіт у сірому чавуні має форму розгалуженої розетки, що росте з одного центру (рис. 10.4,а).

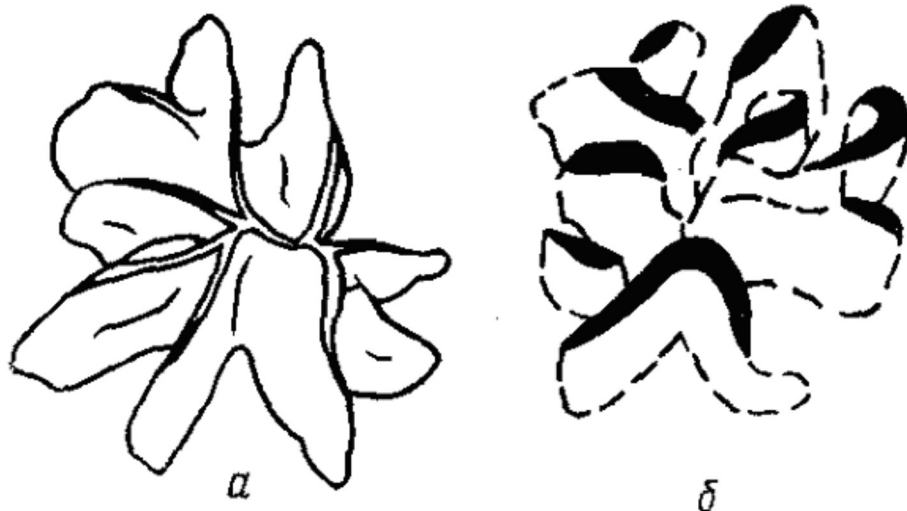


Рисунок 10.4 Модель розетки графіту (а) і її перетин площиною мікрошліфа (б)

У площині мікрошліфа спостерігаються ізольовані і безладно розташовані пластинчасті включення графіту, що виростили наче незалежно одне від одного. У дійсності вони є перетинами окремих відгалужень цієї розетки (рис. 10.4, б).

На формування первинного графіту ефективно впливають поверхнево-активні добавки (модифікатори II роду), що змінюють міжфазний поверхневий натяг і вирівнюють швидкість росту кристалів графіту і різних напрямках. До таких добавок можна віднести Zn, Sn, Bi, Cd, Ti, Sb, Ba, Li, Na, K, Cs, а також La, Ce, Y і інші РЗМ. Наприклад, за даними К. П. Буніна, у сірому чавуну при збільшенні вмісту церію з 0,04 до 0,24...0,45 % форма первинного графіту змінюється від розеточно - пелюсткової до сніжинкоподібної (рис. 10.5).

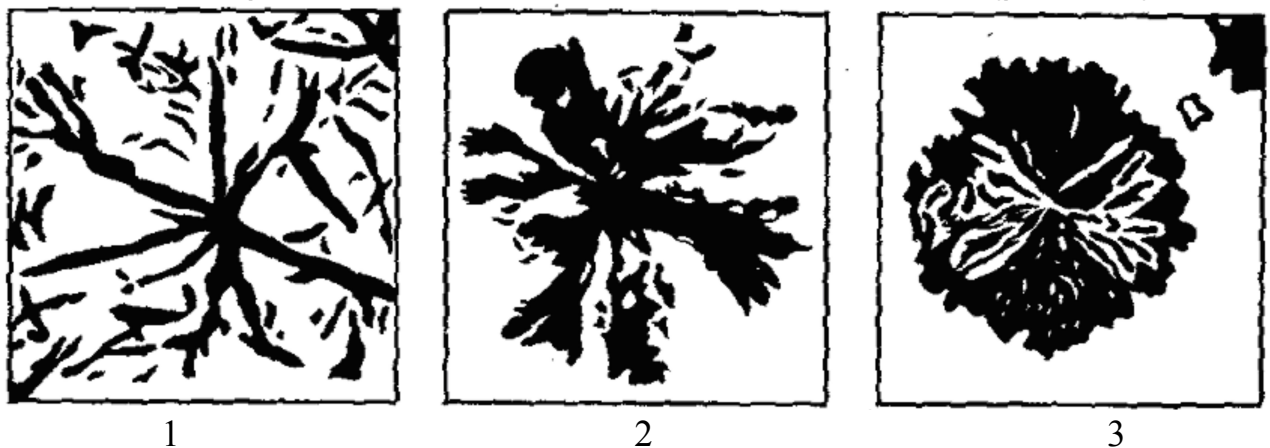


Рисунок 10.5 Зміна форми включень первинного графіту в сірому чавуні при збільшенні вмісту церію (x300): 1 – 0,04 %; 2 – 0,24 %; 3 – 0,45%

Евтектичний графіт росте також у формі розеток чи сферокристалів. У доевтектичному чавуні розмір евтектичних колоній визначається розміром міждендритних осередків первинного аустеніту. Ступінь розгалуження і форма евтектичного графіту сильно залежать від швидкості охолодження. При повільному охолодженні відгалуження графітової розетки далеко врастають в аустеніт і розетка набуває форми крабу. Прискорення охолодження призводить

до інтенсивного розщеплення і розгалуження графітового кістяка евтектичних колоній (при кристалізації аустенітно-графітової евтектики ведучою фазою є графіт). Всередині колонії утвориться безліч графітових включень гніздоподібної форми, а самі колонії матимуть кулясту форму. При подальшому збільшенні швидкості охолодження всередині евтектичних колоній утворюються дендрити аустеніту, а дисперсні графітові включення - у вигляді окремих крапок чи завихрених пластинок розташовуються в міжвісних просторах. Такий графіт має назву міждендритний. Вторинний графіт утворюється внаслідок зменшення розчинності вуглецю в аустеніті, при евтектоїдному розпаді аустеніту, а також при розпаді цементиту за реакцією:



В останньому випадку, найбільш характерному для графітизуючого відпалу чавуну, виділяються наступні стадії процесу:

- 1 Розчинення цементиту в аустеніті.
- 2 Дифузія вуглецю у твердому розчині до місць формування зародків нової фази.
- 3 Утворення графітових зародків і кристалізація графіту.
- 4 Дифузія атомів заліза і легуючих елементів.

Формування нових графітових виділень відбувається на вже наявних виділеннях, а також на поверхнях мікротріщин і мікропор, у місцях скупчення дислокацій та інших дефектів кристалічної будови. При відсутності в чавунах готових пластинчастих включень вторинний графіт утворює компактні пластівчасті включення.

Класифікація, маркування й призначення машинобудівних чавунів

Механічні властивості чавунів в основному визначаються розмірами і формою графітних включень – пластинчастою (ГОСТ 1412-85), вермикулярною (ГОСТ 28394-89), агрегатною (пластівчастою) (ГОСТ 1215-79) або кулястою (ГОСТ 7293-85).

Сірий чавун (в яком частина вуглецю перебуває у вільному стані у вигляді графіту та має на зламі сірий відтінок) використовують для виготовлення корпусів та кришок редукторів, блоків та головок циліндрів двигунів, зірочок транспортерів та елеваторів, інших деталей сільськогосподарських машин.

Марки сірого чавуну – СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40. Числа, помножені на 10, означають межу міцності на розтяг в МПа. Сірі чавуни, основа яких складається з фериту, називають феритними, з фериту і перліту - феритно-перлітними, а з перліту – перлітними. Типовий склад сірих чавунів такий: 3,2...3,5 % С; 1,4...3,0 % Si; 0,4...0,6 % Mn; 0,10...0,125, 0,3...0,8 % P; решта – залізо. Границя міцності чавуну на розтяг становить 100...350 МПа, твердість 145...270 НВ, відносне видовження $d = 0,2...0,8 \%$, а ударна в'язкість не перевищує 0,1 МДж/м² (для порівняння, ударна в'язкість фериту досягає 2 МДж/м²).

Сірі чавуни з пластинчастою формою графіту (див. рис. 10.3, а) виплавляють із спеціально підготовленої шихти у різних плавильних агрегатах (вагранках, електропечах). Структура цих чавунів зумовлюється повільним охолодженням і наявністю деяких домішок (переважно кремнію), що сприяють розпаду цементиту. Особливостями будови сірого чавуну зумовлюються його

низькі механічні властивості. Оскільки графітні включення утворюють своєрідні порожнини та надрізи в металевій основі, чавун із пластинчастим графітом має низьку міцність і пластичність, погано витримує ударні навантаження.

Механічні властивості чавунів зумовлюються в основному їх структурою, а не хімічним складом, тому ці властивості зазначають у марках чавунів. Наприклад, марка СЧ 15 позначає сірий чавун з границею міцності на розтяг 150 МПа.

Графітні включення пластівчастої і особливо кулястої форм (див. рис. 10.3, в, г) меншою мірою порушують металеву основу, тому такі чавуни мають значно більшу міцність і в'язкість, ніж звичайні сірі. Чавуни з вермикулярним графітом (ЧВГ). Включення вермикулярного (червоподібного) графіту (див. рис. 10.3, б) більш компактні, ніж пластинчасті, характеризуються відношенням довжини до товщини від 2 до 10. Тому чавуни з такими графітними включеннями мають проміжне місце між сірими і ковкими чавунами. Чавуни з такими включеннями графіту одержують за спеціальною технологією в ливарному виробництві. У марці чавуну з вермикулярним (ЧВГ) графітом зазначають, як і в марці сірого, границі міцності св (наприклад, ЧВГ 40).

Ковкі чавуни (чавуни з пластівчастою формою графіту) одержують шляхом тривалого відпалювання (томління) білих доевтектичних чавунів з вмістом 2,2...3,2% С, 0,7...1,5% Si, 0,2...0,6% Mn. У процесі томління цементит білого чавуну розпадається на ферит і пластівцевий графіт. Такий чавун має підвищену міцність та високу в'язкість. Відпал полягає у нагріванні і витримуванні при температурі 950...1000°C (від 3 до 15 год), повільному охолодженні в інтервалі температур 740...720 °C. Залежно від режиму томління ковкі чавуни мають феритну, феритно-перлітну і перлітну металеві основи з вкрапленнями пластівцевого графіту.

З ковких чавунів виготовляють корпуси трансмісій тракторів та автомобілів, пальці сінокосарок, картери редукторів, корпуси ведучих мостів зернозбиральних комбайнів, маточини коліс тощо.

Марки ковкого чавуну – КЧ30-6, КЧ35-10, КЧ37-12 (феритні), КЧ45-6, КЧ50-4, КЧ60-3 (ферито-перлітні) тощо. Розшифрування КЧ30-6: К - ковкий, Ч – чавун, 30 – межа міцності на розтяг 300 МПа (30 кг/мм²), 6 – відносне видовження 6%.

Високоміцний чавун (чавун з кулястим графітом) отримують подвійним модифікуванням сірого чавуну. Для цього у рідкий чавун перед заливанням у форми додають два модифікатори – феросиліцій для створення великої кількості центрів графітизації та магній або церій для отримання кулястої форми графіту (див. рис. 10.3, г). Структура високоміцного чавуну складається з феритної, феритно-перлітної (див. рис. 10.3, е) чи перлітної металеві основи. За своїми механічними властивостями високоміцний чавун переважає сірий і ковкий. Використовується для виготовлення колінчастих валів двигунів, зубчастих коліс тощоших відповідальних деталей машин. Марки високоміцного чавуну Ч45, ВЧ50, ВЧ60. Розшифровується ВЧ45 так: В – високоміцний, Ч – чавун, 45 – межа міцності на розтяг 450 МПа (45 кг/мм²).

Леговані чавуни та їх призначення. Чавуни, які вмістять спеціальні елементи (Х – хром, С – кремній, Г – марганець, Н – нікель, Д – мідь, М – молібден, Т – титан, Ю – алюміній, Ш – вказує що чавун має кулястий графіт), мають назву „леговані чавуни” та поділяються на корозійностійкі, жаростійкі і жароміцні, зносостійкі, немагнітні та інші.

Корозійностійкі. Приклади таких чавунів: нірезит (містить додатково 14 % Ni, 2 % Cr, 7 % Cu), нікросилал (містить 5 % Si, 18 % Ni, 2 % Cr тощо). Для підвищення корозійної стійкості кременисті чавуни додатково легують молібденом (ЧС15М4, ЧС17М3). У лугах високу корозійну стійкість мають нікелеві чавуни, наприклад аустенітний чавун ЧН15Д7.

До *жаростійких* належать чавуни, леговані силіцієм (ЧС13, ЧС15, ЧС17) і хромом (ЧХ22, ЧХ28, ЧХ32). Вони досить стійкі в сірчаній, азотній і багатьох органічних кислотах. Жаростійкий чавун – чугаль містить 20...25% алюмінію. Жаростійкість чавунів підвищують легуванням силіцієм (ЧС4) або хромом (ЧХ32). Високу жаростійкість мають аустенітні чавуни – сірий ЧН15Д7 і з кулястим графітом ЧН11Г7Ш.

Як жароміцні використовують аустенітні чавуни з кулястим графітом ЧН19ХЗШ і ЧН11Г7Ш.

Немагнітні чавуни – нікель-марганцевий (містить 7...10 % Mn, 7...9 % Ni) або марганцево-мідний (містить 9,8 % Mn і 1,2...2,0 % Cu) – використовують для виготовлення кожухів і бандажів електричних машин.

Леговані чавуни потрібні у випадку, коли вилівок, окрім міцності, має забезпечити певний рівень специфічних властивостей, наприклад хімічну або корозійну стійкість, зносо-, жаростійкість тощо.

ТЕМА №11 Вплив домішок на структуру і властивості чавуну

Кремній – графітоутворювальний елемент, який сприяє розпаду цементиту в чавуні і виділенню графіту. З підвищенням його вмісту кількість цементиту в чавуні зменшується, а графіту відповідно збільшується. При цьому твердість і міцність чавуну знижуються. У сірих чавунах його міститься 0,75...3,75%. Кремній найбільше посилює графітизацію чавуну і під час первинної кристалізації, і під час розпаду цементиту. Підвищуючи вміст кремнію, можна збільшувати кількість графіту й зменшувати кількість цементиту, наближаючись до створення чавуну з феритного металевою основою. Зменшуючи частку кремнію, можна сформувати структуру чавуну з перлітною основою.

Марганець, навпаки, перешкоджає розпаду цементиту а, отже, сприяє вибілюванню чавуну. Марганець протидіє графітизації, сприяючи утворенню цементиту. Водночас він дещо поліпшує механічні властивості відливок. У сірих чавунах масова частка марганцю становить до 1,2 %. У такій кількості він корисний, бо підвищує міцність чавуну.

Сірка – шкідлива домішка, вона надає чавуну крихкості, перешкоджає розпаду цементиту. Масова частка сірки в чавуні має бути не більш як 0,1%. Сірка погіршує механічні й ливарні властивості чавуну. Вона сильніше від марганцю протидіє графітизації й сприяє виділенню цементиту. Крім цього, сірка знижує рідкотекучість чавуну, збільшує усадку, підвищує схильність до утворення газових бульбашок і тріщин. З цієї причини вміст сірки в чавунах дуже обмежують.

Фосфор утворює в чавуні тверду і крихку евтектику, тому вміст його має бути не більше як 0,3%. Фосфор практично не впливає на графітизацію. Його використовують у чавунах для підвищення рідкотекучості, твердості та зносостійкості. Фосфор розчиняється у фериті до граничної концентрації 0,3 %. Коли концентрація вища, фосфор крім твердого розчину утворює з вуглецем і залізом потрібну легкоплавку евтектику. Залежно від кількісного співвідношення компонентів температура плавлення евтектики коливається від 950 до 980°C. Структура фосфідної евтектики відзначається підвищеною твердістю. Чавуни з високою концентрацією фосфору широко використовують для художнього лиття.

Серед легуючих (тобто спеціально введених) елементів найпомітніший вплив на графітизацію мають *мідь, нікель і хром*. Із них мідь і нікель інтенсифікують графітизацію, а хром її послаблює. Дрібні тверді частинки, зрівноважені в рідкому розчині, сприяють виділенню графіту центрами графітизації. Збільшення швидкості охолодження, як уже згадувалось, спричиняє все більше відхилення від рівноважних умов кристалізації: гальмує виділення графіту й сприяє утворенню цементиту.

Окрім швидкості охолодження значно впливають на графітизацію чавуну вуглець і кремній. Зі збільшенням їх сумарної частки графітизація посилюється. Щоб спрогнозувати результат формування металевої основи чавуну, користуються структурною діаграмою (рис. 11.1), яка показує залежність між сумарною масовою часткою вуглецю й кремнію та швидкістю охолодження

(товщиною стінки відливки). Масова частка марганцю, фосфору й сірки в досліджуваному чавуні залишається незмінною.

Поле діаграми розбите на п'ять ділянок. Ділянка I відповідає найбільшій швидкості охолодження, при якій створено умови для формування білого чавуну зі структурою перліт + вторинний цементит + ледебурит видозмінений. На ділянці V швидкість охолодження найменша, що сприяє повній графітизації та утворенню чавуну з феритною металевою основою, де практично весь вуглець знаходиться у вигляді графіту. Ділянка II зайнята половинчастим чавуном, в перлітній основі якого маємо вторинний цементит і графіт. Кількість зв'язаного вуглецю в половинчастому чавуні перевищує 0,8 %. Ділянка III містить чавун з перлітною основою й графітом. У цьому чавуні кількість зв'язаного вуглецю становить ~ 0,8 %. На ділянці IV маємо чавун зі структурою ферит + перліт + графіт. Тут кількість зв'язаного вуглецю менша за 0,8%.

I – білі чавуни зі структурою перліт + вторинний цементит + ледебурит видозмінений;

II – половинчасті чавуни, в перлітній основі яких є вторинний цементит і графіт (кількість зв'язаного вуглецю в половинчастому чавуні перевищує 0,8 %);

III – перлітні чавуни з перлітною основою й графітом (кількість зв'язаного вуглецю становить ~ 0,8 %);

IV – ферито-перлітні чавуни (ферит + перліт + графіт);

V – феритні чавуни (повна графітизація та утворення чавуну з феритною металевою основою, де практично весь вуглець перебуває у вигляді графіту).

Таким чином, регулюючи сумарну частку вуглецю і кремнію та швидкість охолодження, можна досягти у сірому чавуні бажаної структури металевої основи. Отже, змінюючи вміст і співвідношення постійних домішок, можна в певних межах змінювати структуру чавуну та його властивості.

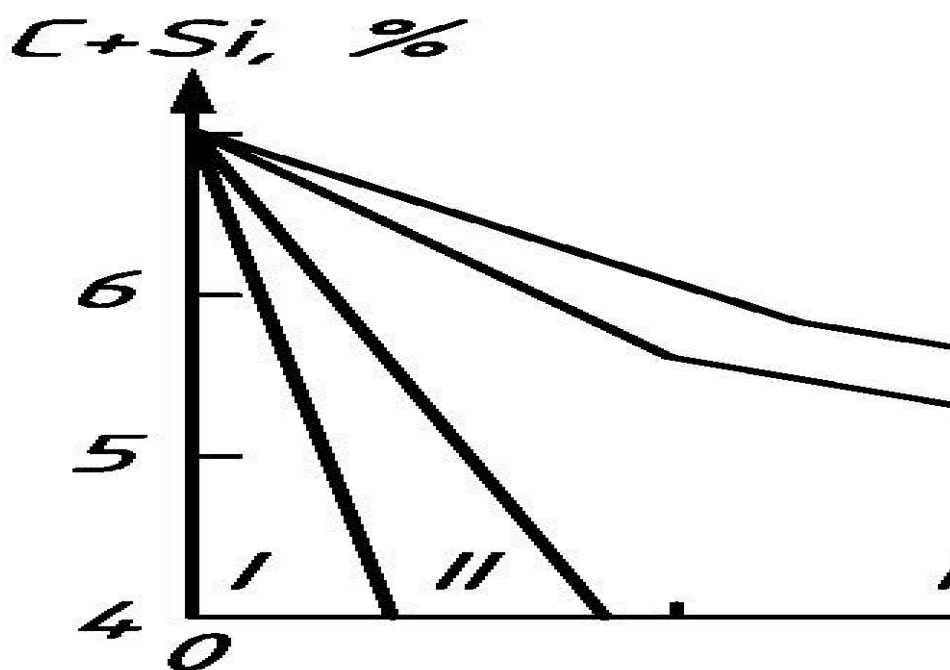


Рисунок 11.1 Структурна діаграма для чавунів, яка показує вплив швидкості охолодження (товщини стінки відливки) і суми C + Si на структуру:

ТЕМА № 12 Теорія легування. Класифікація легованих сталей та їх використання в машинобудуванні. Основи теорії легування сталей

Легованими називають сталі, які, крім заліза, вуглецю і технологічних домішок, містять спеціальні домішки (легуючі елементи). Легуючі елементи вводять до складу сталі для надання їй або покращання певних фізичних, хімічних, механічних або технологічних властивостей. Сталі можуть містити один або кілька легуючих елементів. Найчастіше використовують такі легуючі елементи як Cr, Ni, Mo, W, Co, Cu, Ti, Zr, Nb, Al, а також Mn > 0.8%, Si > 0.5%.

Потрібно пам'ятати, що легуючі елементи мають спорідненість до кисню, сірки та азоту. Тому при вводиті легуючих елементів у сталь можливо утворення їх хімічних сполук з киснем, сіркою та азотом. За збільшенням спорідненості до кисню елементи можна розташувати у наступному порядку (при $t = 1600$ оС): Ni, Mo, W, Fe, Cr, Mn, Si, C, V, Ti, Mg, Al, Zr, Ba, Ce, Ca.

За збільшенню спорідненості до сірки їх можна містити (при $t = 1600$ оС) так Si, Al, Fe, Mn, Ti, La, Ca, Ce. Експерименти показують, що у неметалевих включеннях (сульфідах, оксидах, окисульфідів) міститься від 19 до 33% Mn (середнє значення – 26%), від 8 до 11% Si (середнє – 9.5%) та до 100 % церію. Значна кількість титану (92 – 97%) у сталях зв'язана в карбонітриди титану.

Основи раціонального легування і роль легуючих елементів в утворенні карбідної фази у сталях Легуючі елементи з хімічною спорідненістю до вуглецю, більшою, ніж у заліза (Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb і ін.), утворюють у сталі карбіди. Карбідоутворюючими легуючими елементами називають елементи, що мають більшу, ніж залізо, спорідненість до вуглецю. Карбідоутворюючі елементи в періодичній системі Менделєєва розташовані лівіше заліза. Вони можуть розчинятись у цементиті (Fe_3C) або утворювати спеціальні карбіди. Ці елементи також частково розчиняються у фериті або в аустеніті. Чим лівіше розташований карбідоутворюючий елемент, тобто що менше заповнений в його атомі енергетичний підрівень d, тим тривкіший металевий карбід. Легуючі елементи (Ni, Co, Si, Cu та ін.), розташовані справа від заліза в періодичній системі Менделєєва, карбідів не утворюють (тому що мають меншу хімічну спорідненість з вуглецем, ніж залізо, і тому (з огляду на велику масу атомів заліза в сталі) практично в карбідоутворенні не приймають участі, а лише розчиняються у фериті й аустеніті. Зі зростанням спорідненості до вуглецю та стійкості карбідних фаз карбідоутворюючі елементи розміщуються у наступний ряд: Fe – Mn – Cr – Mo – W – Nb – V – Ti – Zr. Чим стійкіший карбід, тим складніше він розчиняється в аустеніті та виділяється при відпуску (табл. 12.1).

12.1 – Температури плавлення карбідів

Тип карбіду	Fe_3C	Mn_3C	Cr_7C_3	Mo_2C	WC	VC	TiC	ZrC
Температура плавлення, °С	1500	1480	1940	2900	2900	3100	3450	3800

При введенні порівняно невеликої кількості легуючого карбідоутворюючого елемента в сталь він спочатку розчиняється в цементиті, заміщаючи частину атомів заліза. При цьому утвориться легований цементит.

Тоді формула утвореного карбіду, що називається легованим цементитом, має вигляд $(Fe, Mn)_3C$, $(Fe, Cr)_3C$.

Наприклад, марганець може замінити в цементиті всі атоми заліза, хром – до 25 % атомів, молібден – до 3 % атомів. Після перевищення легуючим елементом граничної розчинності в присутності надлишкового вуглецю утворюються спеціальні карбіди типу Cr_7C_3 , Mn_3C , TiC , VC та ін. За будовою кристалічних ґраток карбіди бувають двох типів. До карбідів першої групи належать Fe_3C , Mn_3C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, що мають складні кристалічні ґратки. Такі карбіди недостатньо міцні і при нагріванні до високих температур розпадаються з утворенням твердого розчину легуючих елементів в аустеніті. Карбіди другої групи Mo_2C , WC , VC (наприклад – $NaCl$), TiC мають прості кристалічні ґратки, що відрізняються великою міцністю і не розпадаються при нагріванні. Усі карбіди мають високу твердість, але твердість карбідів другої групи трохи вище.

Розподіл легуючих елементів між феритом та карбідами показаний на рис. 12.1. З рисунку видно, що марганець, маючи спорідненість з вуглецем, як залізо, необмежено розчиняється в цементиті і дає загальний із залізом карбід типу $(Fe, Mn)_3C$, відрізняючись значною розчинністю у фериті, марганець, введений у сталь, є присутнім і в фериті, і в карбідах. Розподіляються в різному співвідношенні між феритом і карбідами й інші карбідоутворюючі елементи. При цьому, чим вище ступінь хімічної спорідненості легуючого елемента до вуглецю, тим більш велика його частка зв'язується в карбіди і менша знаходиться в α -твердому розчині.

Залежність частки легуючого елемента, розчиненого у фериті, залежно від його загального вмісту в сталі для марганцю, хрому, молібдену, ванадію (елементи розташовані за зростанням ступеня хімічної спорідненості до вуглецю), наведена на рис. 12.1.

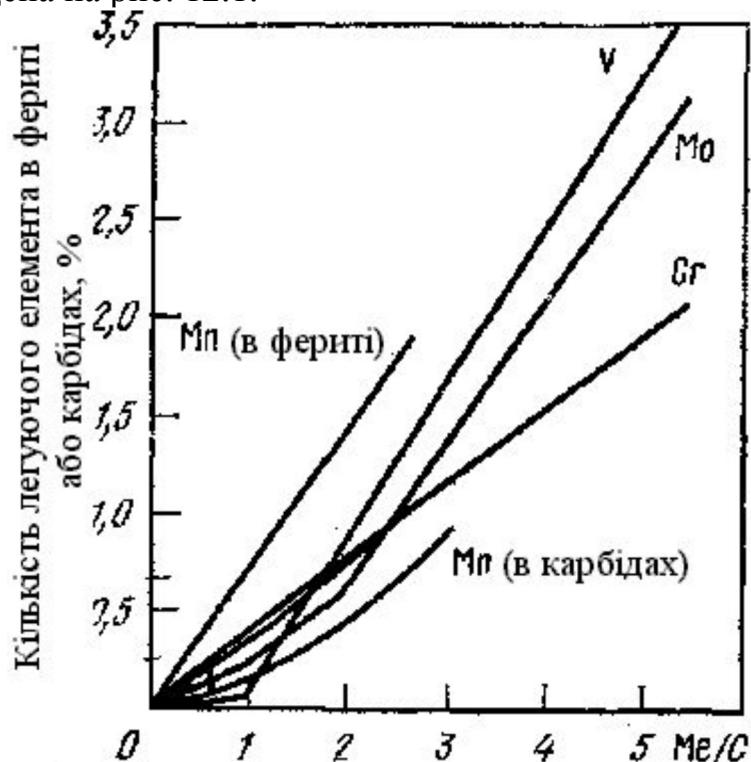


Рисунок 12.1 Розподіл легуючих карбідоутворюючих елементів між феритом і карбідами

На цьому графіку кількість легуючого елемента, введеного в сталь, представлено у вигляді відношення Me/C , де Me - кількість легуючого елемента [% (ат.)], C – кількість вуглецю [% (ат.)], тому він справедливий для сталей з різним вмістом вуглецю і легуючих елементів. Для марганцю наведено так само його кількість, зв'язана в карбід.

Мала відмінність ступеня хімічної спорідненості до вуглецю марганцю порівняно з залізом призводить до того, що велика його частина розчиняється у фериті, а менша бере участь в утворенні карбиду $(Fe, Mn)_3C$. При легуванні марганцем конструкційних сталей у широкому інтервалі концентрацій відбувається безперервне в постійному співвідношенні збагачення їм фериту і карбідів. При такій поведінці марганцю, як легуючого елемента, властивості сталі зі збільшенням його вмісту повинні змінюватися постійно. Якщо іноді в зміні властивостей спостерігається порушення безперервності, то причиною цього є не зміна складу фериту або карбідів, а поява нової голчастої нерівноважної складової структури. При легуванні сталі елементами з високим ступенем хімічної спорідненості до вуглецю закономірності їх розподілу між карбідами і феритом істотно інші, ніж марганцю. Найкраще можна простежити на прикладі ванадію, такими ж будуть закономірності для титану та ніобію.

Ванадій, а також титан, ніобій, цирконій утворюють з вуглецем карбід практично одного типу MeC . На прикладі ванадію (див. рис. 12.1) видно, що для цих елементів існують дві стадії легування. На першій стадії зі збільшенням вмісту легуючого елемента $V/C \approx 1$ відбувається слабе збагачення ним твердого розчину і зв'язування основної його частки в карбіді. При цьому збільшується кількість карбиду легуючого елемента і зменшується кількість цементиту. Перехід від першої стадії легування до іншої ($V/C > 1$) характеризується завершенням переходу від карбиду Fe_3C до VC . Цим завершується процес карбідоутворення при легуванні конструкційної сталі також і такими елементами, як Ti , Nb , Zr . На першій стадії легування перехід від цементиту до спеціального карбиду легуючого елемента супроводжується зменшенням розмірів карбідних часток, тобто ростом дисперсності часток карбідної фази та зниженням вмісту вуглецю у фериті відповідно до рівноваги системи α -твердий розчин – карбід. Друга стадія легування характеризується активним збагаченням α -твердого розчину легуючим елементом. На цій стадії легування, але вже при тривалих нагріваннях, може відбуватися виділення карбідів у дисперсній формі. Для інших легуючих карбідоутворюючих елементів, таких як Cr , Mo і W , що мають меншу спорідненість до вуглецю, ніж розглянуті вище V , Ti і Nb , загальні закономірності зміни фазового і структурного стану такі ж. Оскільки ці елементи утворюють з вуглецем не один, а кілька типів карбідів, першу стадію легування розділяють на кілька етапів відповідно до змін карбідної фази. Так, для молібдену (див. рис. 12.1) перший етап першої стадії легування закінчується при $Mo/C \approx 1$ і відповідає завершенню переходу карбиду типу Me_3C , тобто $(Fe, Mo)_3C$, у карбід типу $Me_{23}C_6$, – $(Mo, Fe)_{23}C_6$. Другий етап цієї стадії легування закінчується при $Mo/C \gg 2$, коли завершується утворення карбиду Mo_6C . Далі при $Mo/C > 2$ починається друга стадія легування, коли весь Mo введений понад зазначену

кількість ($Mo/C > 2$) і молібден переходить у α -твердий розчин. Для хрому з ще меншою спорідненістю до вуглецю, ніж молібден, перший етап першої стадії легування обмежується $Cr/C \approx 1,2$ і відповідає переходу карбіду Me_3C , тобто $(Fe, Cr)_3C$, у карбід Me_7C_3 , – $(Cr, Fe)_7C_3$, а другий етап першої стадії легування не завершується і при $Cr/C \approx 5$, тому що в цьому випадку не закінчується перехід карбіду Me_7C_3 у $Me_{23}C_6$. Друга стадія легування хромом настає при $Cr/C > 10$.

ТЕМА 13 Вплив легуючих елементів на критичні точки, структуру та властивості сталей

Вплив легування на поліпшення властивостей сталі ґрунтується на:

1. Зміні критичних точок і стійкості переохолодженого аустеніту. Легуючі елементи утворюють із залізом тверді розчини заміщення, впливаючи на критичні температури A_3 і A_4 , що обмежують області існування гомогенних твердих розчинів α - і γ -заліза діаграми залізо–легуючий елемент (рис. 13.1.).

Таким чином, залежно від впливу на поліморфні перетворення α - чи γ -твердого розчину, легуючі елементи поділяють на дві групи. Елементи першої групи – Ni, Mn і Co (γ -стабілізатори) підвищують критичну температуру A_4 і знижують критичну температуру A_3 . У результаті область γ -заліза розширюється, а α -заліза – звужується (див. рис. 12.2,а). На поданій вище схематичній діаграмі залізо - легуючий елемент, бачимо, що, починаючи з деякої концентрації M легуючого елемента, маємо γ -твердий розчин у проміжку температур від кімнатної до лінії солідус. Сплави з концентрацією легуючого елемента, що перевищує M називають аустенітними. Вони не зазнають фазових перетворень $\alpha \leftrightarrow \gamma$ під час нагрівання і охолодження.

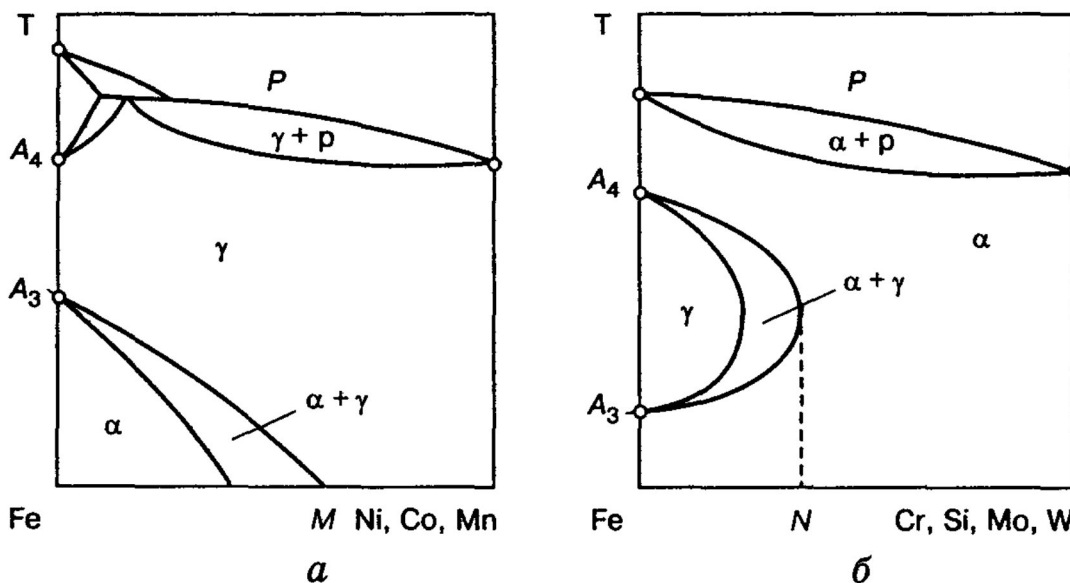


Рисунок 13.1 Вплив легуючих елементів на положення критичних точок у сталі

Друга група елементів – Al, Si, V, Cr, Mo, W, Ti, Be та ін. (α -стабілізатори) знижує критичну температуру A_4 й підвищує критичну температуру A_3 , звужуючи область γ -твердого розчину (див. рис. 12.2, б) і розширюючи область α -твердого розчину у правій частині діаграми. Сплави на основі заліза, які, починаючи з концентрації N легуючого елемента, мають в усьому діапазоні температур тільки α -твердий розчин, називаються феритними.

Багато елементів (W, Cr, Si, Mo, Mn, V, Ti) зміщують положення критичних точок на діаграмі залізобуглецевих сплавів (лінія SE) ліворуч (рис. 13.2). Внаслідок цього сталь, легована цими елементами, буде утворювати перлітну структуру при вмісті вуглецю $< 0,8\%$.

Легуючі елементи, що не утворюють карбіди, затримують перетворення аустеніту в перліт, сорбіт і троостит, про що свідчить зсув вправо лінії початку перетворення аустеніту (рис. 13.3,а) проти відповідної лінії для вуглецевої сталі. Винятком є кобальт, який прискорює таке перетворення. Карбідоутворюючі елементи також зсувають вправо С-подібну криву ізотермічного перетворення (рис. 13.3,б). Проте початок бейнітного перетворення у легованих такими елементами сталях відбувається дещо раніше, ніж у вуглецевих за однакового вмісту вуглецю (див. нижню С-подібну криву). Отже, дуже важливою властивістю легуючих некарбідо- й карбідоутворюючих елементів є їх здатність збільшувати інкубаційний період в районі перлітного, сорбітного й трооститного перетворень, зменшувати критичну швидкість охолодження (рис. 13.5) і підвищувати прогартованість легованих сталей (рис. 13.5).

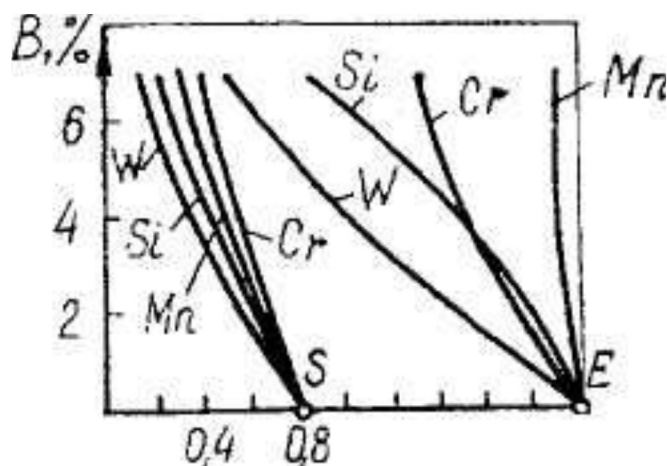


Рисунок 13.2 Вплив легуючих елементів В на положення точок S (C=0,8%) і E (C = 2,14%)

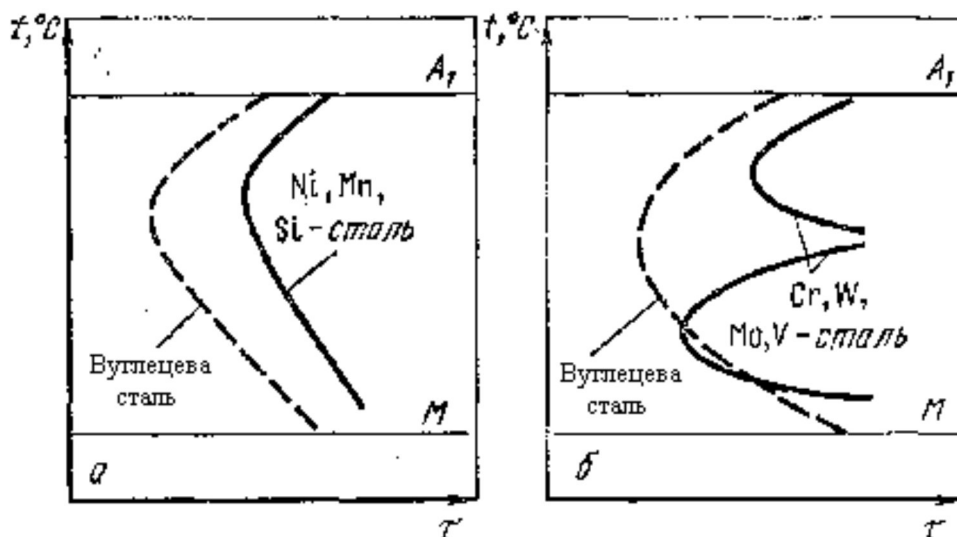


Рисунок 13.3 Схеми діаграм ізотермічного перетворення аустеніту: а – вуглецева сталь і сталь, легована некарбідоутворюючими елементами; б – вуглецева сталь і сталь, легована карбідоутворюючими елементами

Найістотніше її збільшують хром, нікель, молібден, марганець.

Карбідоутворюючі елементи підвищують прогартованість лише, якщо вони повністю розчиняються в аустеніті під час нагрівання. Коли температура

гартування залишається в межах 800...900 °С, то карбіди вольфраму, ванадію, ніобію, титану у твердий розчин не переходять і під час розпаду аустеніту стають центрами вторинної кристалізації, знижуючи прогартованість.

Бор, доданий у невеликій кількості (0,001...0,005%), концентрується у складі твердого розчину на границях зерен аустеніту, що сприяє зростанню стабільності аустеніту. Легуючі елементи збільшують інкубаційний період в районі перлітного, сорбітного й трооститного перетворень, зменшують критичну швидкість охолодження (рис.13.4) і підвищують прогартованість легованих сталей (рис. 13.5). Особливо ефективно підвищується прогартованість, якщо ввести до складу сталі не один, а кілька легувальних елементів, наприклад Сг + Ni, Сг + Мо, Сг + Ni + Мо тощо.

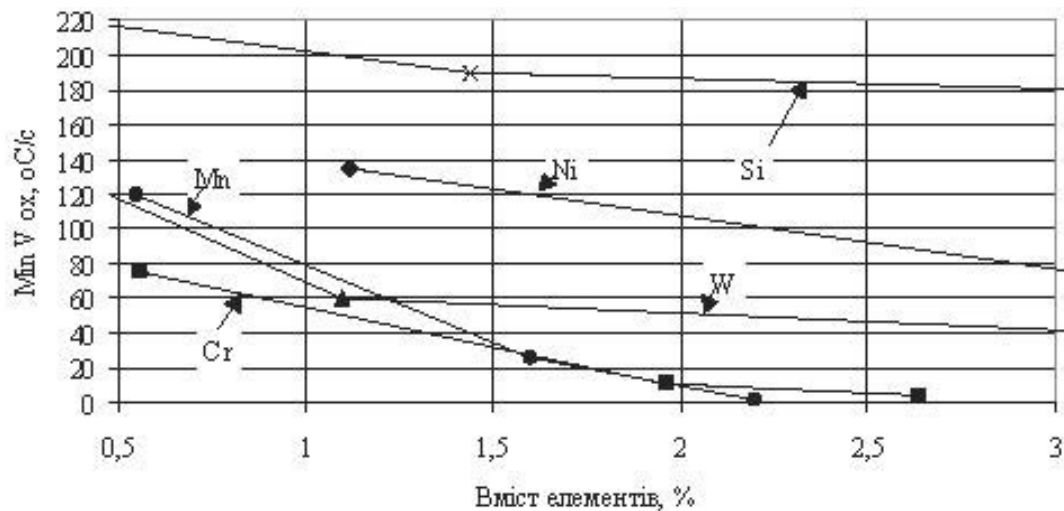


Рисунок 13.4 Вплив легуючих елементів на нижню критичну швидкість гартування при охолодженні від 950 °С

Легуючі елементи впливають на температури початку (Мп) і кінця (Мк) мартенситного перетворення, з чим пов'язана частка залишкового аустеніту в загартованій сталі (рис. 13.6).



Рисунок 13.5 Вплив легування на прогартованість сталей

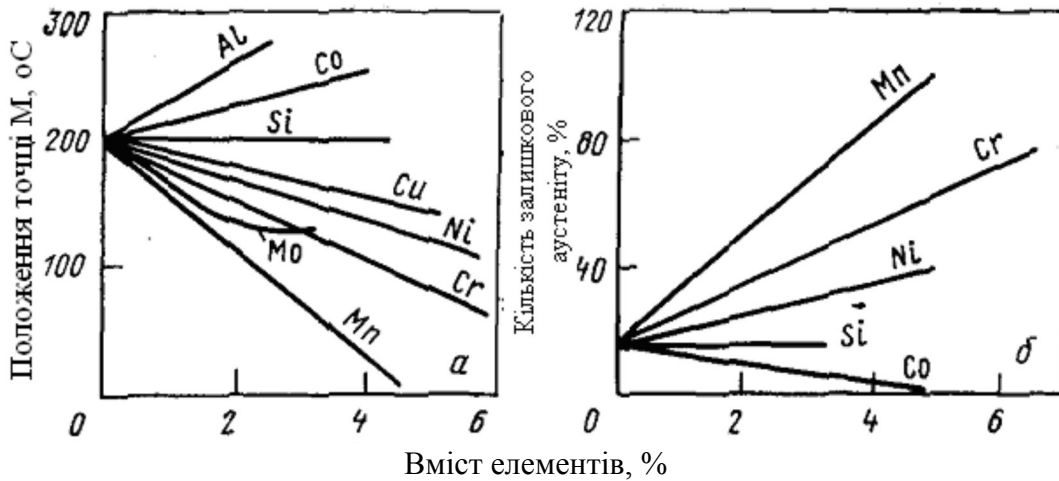


Рисунок 13.6 Вплив легуючих елементів на температуру мартенситного перетворення (а) та кількість залишкового аустеніту (б) у сталі з 1 % вуглецю

Зокрема, алюміній і кобальт підвищують положення ліній Мп і Мк на діаграмі ізотермічного перетворення, кремній не впливає на них, а більшість елементів знижує ці температури. Наприклад, 5 % Мп знижує початок мартенситного перетворення до 0 °С, тому за такого або більшого вмісту марганцю сталь має аустенітну структуру післяповного охолодження.

Кількісна закономірність впливу легуючих елементів на зміну температури початку мартенситного перетворення, встановлена А.А. Поповим, така:

$$M_p = 520 - 320 \times C\% - 50 \times Mn\% - 30 \times Cr\% \times (Ni + Mo) - 5 \times (Cu + Si), \quad (12.1)$$

2. Зміні швидкості дифузійних процесів і виділення та коалесценції карбідів.

Вміст легуючих елементів

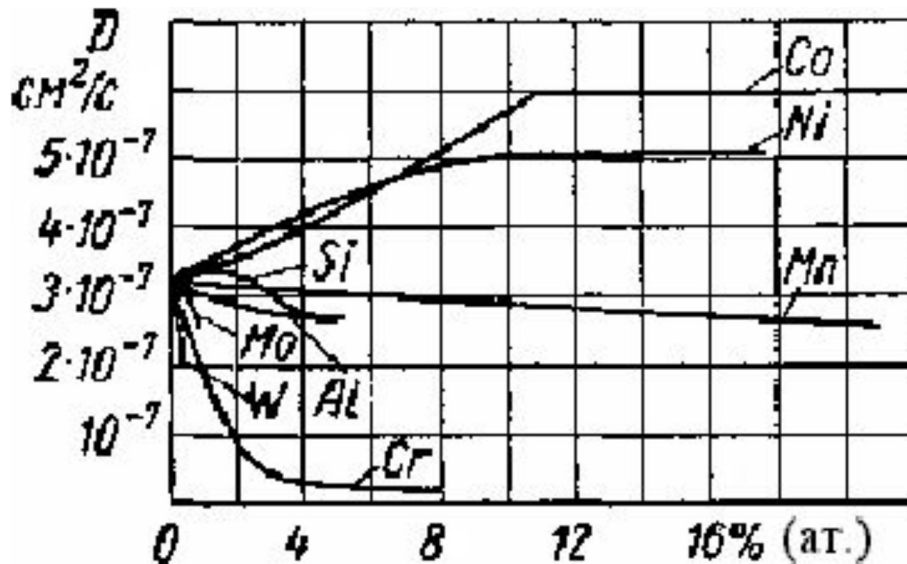


Рисунок 13.7 Вплив легуючих елементів на коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті (1050 °С, 0,4% С)

3. Зміні стійкості карбідів (див. табл. 13.1).

4. Впливі на стан твердого розчину основи (фериту чи аустеніту) тієї частки легуючого елемента, що не зв'язується в карбіди та розчинюються у основі (твердорозчинне зміцнення).

Ступінь взаємодії легуючого елемента з феритом визначається співвідношенням атомних радіусів заліза і легуючого елемента, а також типів і параметрів їх кристалічних ґраток. Розчиняючись в а-залізі, атоми легуючих

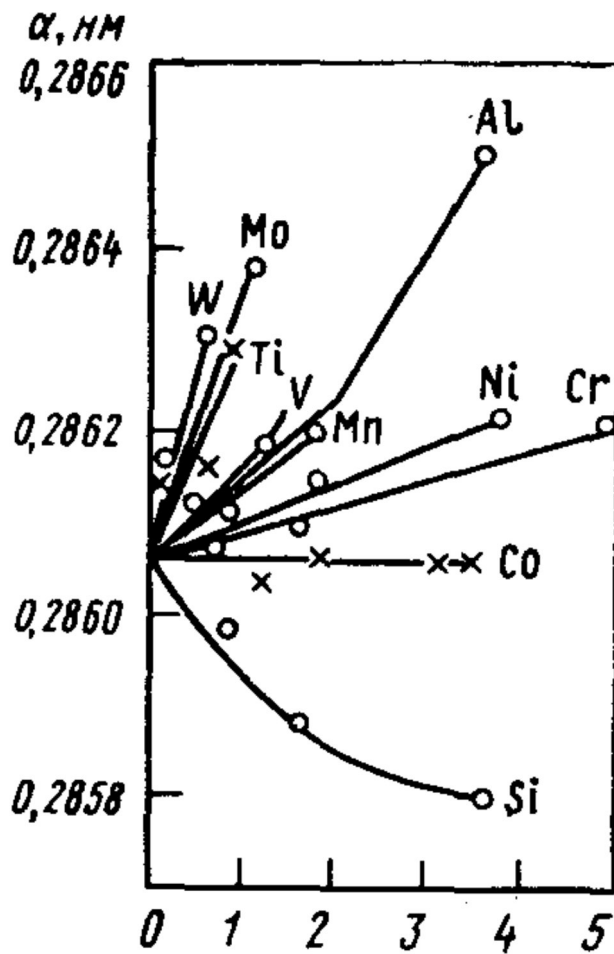
елементів збільшують або зменшують параметр його кристалічної ґратки залежно від співвідношення атомних радіусів заліза й легуючого елемента (рис. 12.9).

Значення коефіцієнта K_i для елементів, що входять до складу легуваних сталей, наведені у табл. 13.2.

Таблиця 13.2 – Коефіцієнт зміцнення фериту при легуванні елементами у кількості 1 % (мас.)

Елемент	C+N	P	Si	Ti	Al	Cu	Mn	Cr	Ni	Mo	V
K_i	467	69	8,6	8,2	6,0	3,9	3,3	3,1	3,0	1,1	0,3

Вплив елементів на термкінетичні умови фазових перетворень призводить до того, що схильність до росту аустенітного зерна зменшують всі легуючі елементи, крім марганцю й бору, а Mo, V, Cr подрібнюють також структуру сталі (рис. 13.9).



Вміст елементів в α -залізі, % (атомн.)

Рисунок 13.8 Залежність постійних α -ґратки заліза від концентрація легуючого елемента

Як наслідок змінюється міцність фериту чи аустеніту основи сталі:

$$D_s = \prod_{i=1}^n K_i \times C_i, \quad (12.2)$$

де K_i - коефіцієнт зміцнення фериту при легуванні яким-небудь елементом у кількості 1,0% (за масою);

C_i - концентрація елемента, розчиненого у фериті.

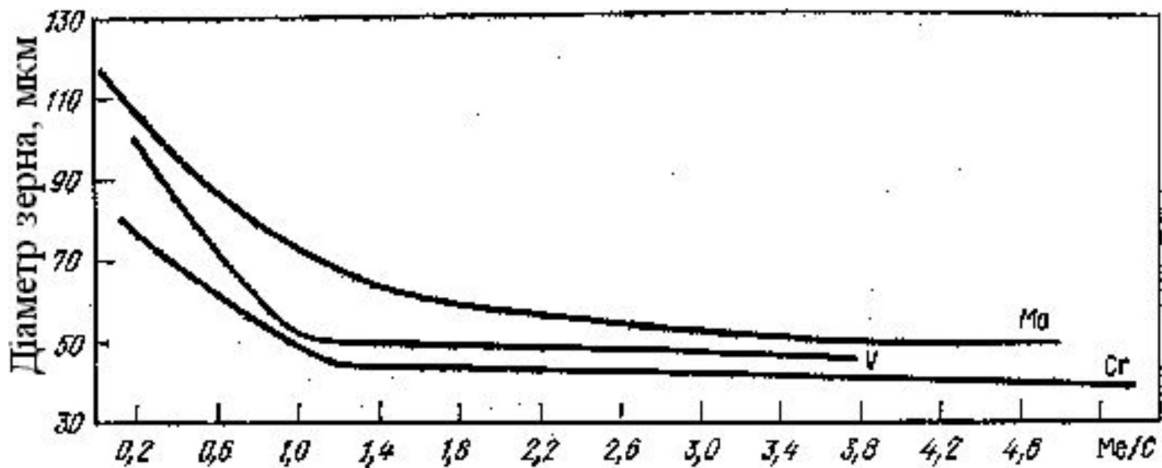


Рисунок 13.9 Вплив ступеня легування конструкційних сталей з 0,2 % С на розмір зерна

Зміни у фазовому і структурному станах, що відбуваються на першій стадії легування, зменшення розмірів карбідів, подрібнення зерна і зниження змісту вуглецю у фериті добре позначаються на механічних властивостях сталей: підвищується їх міцність і в'язкість. Така зміна властивостей має місце і при збільшенні вмісту легуючого елемента в межах співвідношення, що відповідає першій стадії. Оскільки період першої стадії легування скорочується з підвищенням ступеня хімічної спорідненості легуючого елемента до вуглецю, кількість введених в конструкційні сталі легуючих елементів повинно бути тим меншим, чим вища їх спорідненість до вуглецю. Тому V, Ti і Nb звичайно вводять у сталь у дуже малих кількостях, більше вводиться молибдену і вольфраму, а ще більше хрому.

На другій стадії легування, коли збільшення вмісту легуючого елемента в сталі супроводжується збільшенням його концентрації у фериті, зміна властивостей сталі визначається в основному зміною властивостей фериту. Тому на другій стадії легування спостерігається, як правило, підвищення міцності сталі, що супроводжується, однак, зниженням її в'язкості та холодостійкості. Така зміна властивостей збільшується іноді додатково ефектом дисперсійного зміцнення. Таким чином, для одержання високого поєднання міцності та в'язкості конструкційної сталі її легування варто обмежувати першою стадією. З підвищенням дисперсності карбідів росте твердість і міцність сталі. Ефективність впливу легуючих елементів на міцність та пластичність середньовуглецевої сталі показана на рис. 13.1.

Оптимальна кількість основних легуючих елементів у сталях показана в таблиці 13.3, а роль легуючих елементів у сталях – у таблиці 13.4.

Таблиця 13.3 – Оптимальна кількість основних легуючих елементів у сталях (% мас.)

Легуючий елемент	Тип сталі		
	Вуглецева	Низьколегована	Легована
Si	0,10...0,50	1,30...2,00	4,0...5,0
Mn	0,40...0,80	0,50...1,50	≥ 2
P	$\geq 0,060$	-	-
S	$\geq 0,060$	-	0,15...0,30

Cr	$\geq 0,040$	1,00...2,00	≥ 2
Ni	$\geq 0,050$	1,00...2,00	≥ 2
Mo	0,20	0,20...0,50	$\geq 0,50$
W	-	0,50 – 0,60	$\geq 1,00$
V	$\geq 0,05$	0,16...0,20	-
Al	$\geq 0,10$	-	9,0 – 11,0
Cu	$\geq 0,3$	-	0,40...1,00
N	$\geq 0,01$	-	-
B	$\geq 0,003$	-	-

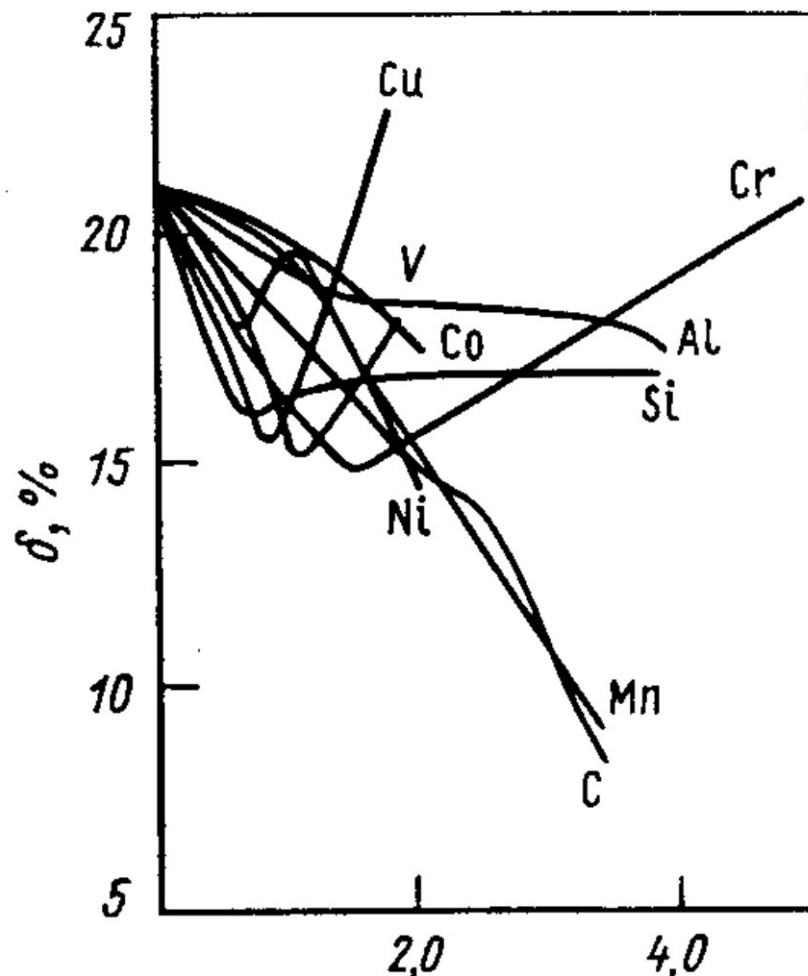
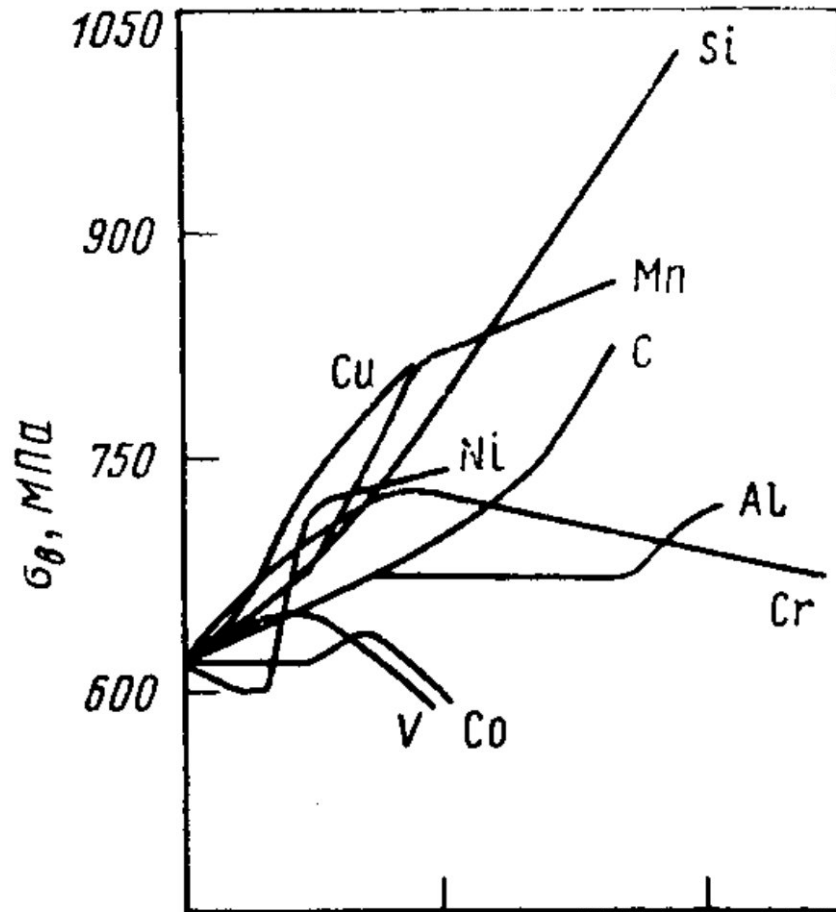


Рисунок 13.10 Вплив легуючих елементів на механічні властивості середньуглецевої сталі

Таблиця 13.4 – Роль легуючих елементів у сталях

Вплив легування на основні фази та властивості сталей	Легуючий елемент і вплив збільшення його концентрації	Зміна властивостей без термічної обробки	Вплив при термічній обробці	
			на зміну властивостей	на режими термічної обробки
Збільшення кількості карбідів	C	Помірне підвищення міцності	Значне підвищення міцності, в'язкості, зниження	Знижується температура гартування
Зміцнення фериту без впливу на карбідну фазу	Si	Істотне підвищення міцності, зниження в'язкості та холодостійкості	Для термічно оброблюваних сталей не використовується	
Підвищення в'язкості та холодостійкості фериту	Ni	Деяке підвищення в'язкості і холодостійкості. Практично не впливає на міцність	Істотне підвищення в'язкості і холодостійкості. Підвищення міцності	Значно збільшується загартованість і прогартованість
Зміцнення фериту і підвищення стабільності карбідів типу Me_3C	Mn, Cr, W, Mo	Ступінь підвищення міцності і в'язкості значно залежить від кількості легуючого елемента	Значне підвищення міцності, невелике підвищення в'язкості	Трохи підвищується температура гартування і відпуску, збільшується прогартованість
Зміцнення фериту та формування карбідів легуючих елементів підвищеної і високої стійкості	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	Підвищення міцності	Істотне підвищення міцності. В'язкість підвищується мало	Підвищується температура гартування, трохи збільшується прогартованість, зменшується схильність до росту зерна при нагріванні, підвищується температура відпуску на задану міцність
Утворення дисперсних зміцнюючих фаз	Mo, V, Nb, Ti, Al, N	Підвищення міцності, зниження в'язкості при незмінному розмірі зерна. При подрібненні зерна підвищення в'язкості	Значне підвищення міцності	Підвищується температура гартування, регламентуються умови відпуску (температура, тривалість, швидкість охолодження)

ТЕМА 14 Класифікація і маркування легованих сталей

Маркування якісної легованої сталі складається зі поєднання букв і цифр, що вказують на її хімічний склад. Легуючі елементи мають такі позначення: азот – А, ніобій – Б, вольфрам – В, марганець – Г, мідь – Д, кобальт – К, берилій – Л, молібден – М, нікель – Н, свинець – П, хром – Х, бор – Р, кремній – С, титан – Т, ванадій – Ф, цирконій – Ц, алюміній – Ю, рідкісноземельні метали – Ч.

Цифри після літери вказують на вміст даного легуючого елемента. При вмісті елемента менше або близько 1 % цифри не пишуть; близько 2 % – цифру 2 тощо. При маркуванні конструкційних якісних сталей цифри перед першою літерою марки використовують для позначення середнього вмісту вуглецю у сотих частках відсотка, а у високовуглецевих інструментальних сталях – в десятих частках відсотка.

Наприклад, сталь марки 20Х містить 0,17...0,23 % С; 0,7...1,0 Cr; сталь 30ХГСН2 – 0,3 % С; до 1 % Cr; до 1 % Mn; до 1 % Si; до 2 % Ni. Літера у кінці марки сталі вказує на обмежений вміст сірки і фосфору (до 0,03 % кожного), а також на те, що дотримано всіх технологічних вимог металургійного процесу виробництва високоякісної сталі. Наприклад, Сталь 18ХНЗА.

Особливо високоякісна сталь має в кінці марки літеру Ш. Наприклад, сталь 95Х18Ш, особливо високоякісна, виплавлена методом електрошлакового переплаву, містить 0,9...1,0 % С; 17...19 % Cr; 0,03 % Р і 0,015 % S.

Деякі групи сталей мають додаткові позначення: марки шарикопідшипникових сталей починаються з літери Ш, швидкорізальних - з літери Р, магнітотвердих - з літери Е, автоматних - з літери А. Для скорочення кількості знаків при маркуванні сталі іноді відступають від загальноприйнятої системи, особливо для складнолегованих сталей. У марках таких сталей не вказують цифру, що означає вміст вуглецю або іншого елемента (інструментальні сталі з вмістом вуглецю понад 1 %).

Класифікація легованих сталей

За хімічним складом, тобто залежно від вмісту вуглецю (низьковуглецеві до 0,25 %, середньовуглецеві – 0,25...0,6 %, високовуглецеві – 0,6...2 %), вмісту основного легуючого елемента (хромисті, нікелеві, хромонікелеві, марганцеві тощо), та сумарною часткою легуючих елементів (низьколеговані вмістять до 2,5% легуючих елементів, середньолеговані – 2,5...10 %, високолеговані – $\geq 10\%$).

Сталі з високим вмістом легуючих елементів, що розширюють g-область на діаграмі стану, утворюють клас аустенітних сталей; сталі з високим вмістом елементів, що звужують g-область, і низьким вмістом вуглецю утворюють клас феритних сталей.

Залежно від структури у рівноважному стані розрізняють сталі:

- доевтектоїдні (від 0,02 до 0,8 % С), які містять у структурі перліт і надлишковий ферит. Наприклад, Сталь 45, 40, 30, 20, 45Х, 30ХРА, 33ХС, 38ХС, 30Х, 30Г2, 20ХГР, 20Х, 16ХГ, 15ХА, 40ХФА, 40ХС, 40ХГР, 35ХГСА та ін.;
- евтектоїдні (0,8 % С) з перлітною структурою. Наприклад, Сталь У9, У8, У8Г, 6ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХС, 7ХФ, 60С2Н2А, 6ХВГ;

– заевтектоїдні (понад 0,8 % С), які мають у структурі надлишкові (вторинні) карбіди. Наприклад, Сталь У13, У12, У10, Х, 9ХС, 9Х1, 8ХФ, 7ХЗ, ХГС, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ, 9ХВГ та ін.;

– ледебуритні, що мають надлишкові карбіди, які виділяються з рідкої фази під час кристалізації. Останні у литому стані утворюють з аустенітом евтектику – ледебурит. Наприклад, Сталь Х12, Р18, Р9.

За структурою після охолодження зразків (діаметром 25 мм) на повітрі розрізняють такі основні класи сталей:

– феритний – сталі містять до 0,3 – 0,4 % С та до 20 – 25 % таких феритоутворюючих елементів як Сг, Si та Al. Наприклад, Сталь 15Х25Т, 15Х28, Х13Ю4, Х14, 12Х17, Х27Ю5, Х25Ю5, Х23Ю5, 0Х17Ю5, 08Х13 та ін.;

– перлітний (сорбітний, трооститний) – сталі цього класу характеризує відносно низький вміст легуючих елементів (0,1...1,5% С та 5 ... 7% інших легуючих елементів). Наприклад, Сталь 45, 40, 30, 20, 45Х, 30ХРА, 33ХС, 38ХС, 30Х, 30Г2, 20ХГР, 20Х, 16ХГ, 15ХА, 40ХФА, 40ХС, 40ХГР, 35ХГСА, 30ХГС, 27ХГР, 18ХГТ, 15ХМ, 50Г2, 45Г2, 38Х2МЮА, 30ХМА, 30ХГТ, 20ХНТР, 20ХГНР, 20ХН, 15Н2М, 60Г, 50ХФА, 50С2, 60С2, 60С2ХА, 50ХГ, 50ХН, 40ХН, 38ХГН, 30ХГСН2А; 12Х1МФ; 25Х2М1Ф; 25Х1МФ; 20Х3МВФ; 18Х3МВ тощо;

– мартенситний – сталі містять дещо більшу кількість легуючих елементів (0,2-0,7% С та 10-15% інших легуючих елементів). Наприклад, Сталь 30Х13Н7С2, 5ХНВ, 20Х13, 15Х11МФ, 15Х5М, 20Х2Н4А, 20ХН4ФА та ін.;

– аустенітний – характеризується високим вмістом легуючих елементів (0,1-1,0% С та 10 – 40 % інших легуючих елементів). Наприклад, Сталь 12Х25Н16Г7АР, 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х14Г14Н4Т, 09Х14Н19В2БР, 06ХН28МДТ, 08Х18Н12Т, 08Х18Н12Б, 17Х18Н9 та ін.

Умови отримання перлітного, мартенситного та аустенітного класів сталей наведені на рис. 14.1.

Існують також такі проміжні класи як:

– перліто-мартенситний. Наприклад, Сталь 5ХНМ, 5ХГМ, 40ХН2МА, 30ХН2МФА, 20ХН2М, 12Х2Н4А, 12ХН3А та ін.;

– мартенсито-феритний. Наприклад, Сталь 40Х9С2, 14Х17Н2, 18Х12ВМБФР, 13Х14Н3В2ФР, 15Х6СЮ та ін.;

– аустеніто-мартенситний. Наприклад, Сталь 09Х17Н7Ю, 09Х15Н8Ю та ін.;

аустеніто-феритний. Наприклад, Сталь 20Х20Н14С2, 20Х23Н13, 08Х21Н6М2Т та ін.

За якістю сталі поділяють на сталі звичайної якості, якісні, високоякісні та особливо високої якості.

За призначенням леговані сталі можуть об'єднуватись у кілька груп:

1. Конструкційні леговані сталі використовують для деталей машин і механізмів та зазвичай піддають термічній обробці.

У свою чергу, їх поділяють на сталі для цементації, які використовують для виробів, що працюючих в умовах тертя, ударних і знакозмінних навантажень. Хімічний склад таких сталей обмежений вмістом вуглецю до 0,25 %, сумарним вмістом легуючих елементів для низьколегованих сталей до 2,5 % і для середньолегованих – 2,5...10 %.

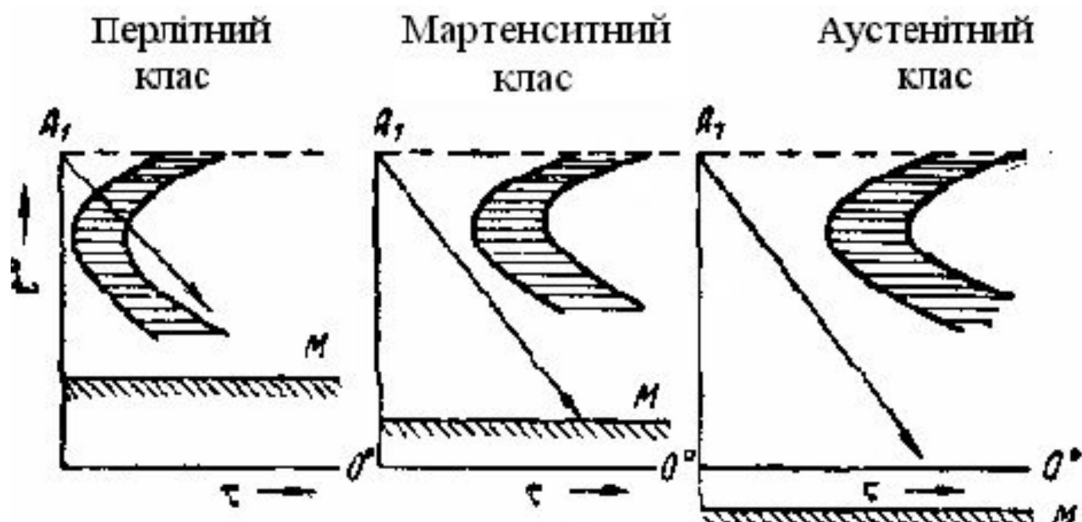


Рисунок 14.1 Умови отримання перлітного, мартенситного та аустенітного класів сталей

Для виробів малих розмірів, що працюють в умовах тертя та незначних навантажень, використовують сталі типу 15ХА, 20Х.

Відповідальні деталі для експлуатації при високих і ударних навантаженнях та великих швидкостях виготовляються зі сталей типу 15ХФ, 18ХГ, 25ХГМ. Великі важконавантажені деталі для експлуатації в умовах динамічних і вібраційних навантажень виготовляють зі сталей, легованих комплексом карбідоутворюючих елементів (Cr, V, Ti, Mo) з нікелем. Це сталь 20ХН, 20ХНЗА, 12Х2Н4, 18ХГТ, 20ХГР.

Сталі поліпшувані (гартування + високий відпуск) – це низьколеговані сталі з вмістом вуглецю 0,3...0,5 %. Для забезпечення потрібних властивостей міцності, пластичності та в'язкості їх піддають гартуванню з високим відпуском (500...600°C), тобто поліпшують. Загальна кількість легуючих елементів у поліпшуваних сталях становить 3...5 % (Cr, Ni, W, Mo, Si, V), основний легуючий елемент – хром (0,8...1,1 %). Розрізняють хромисті сталі – 40Х, 45Х. Для прогартуваності їх додатково легують бором (0,002 - 0,003 % - Сталь 40ХР) або марганцем (до 1 % - Сталь 40ХГ). З них виготовляють деталі для роботи в умовах підвищених напружень і знакозмінних навантажень – шатуни, колінчасті вали тощо. Хромомарганцеві сталі, леговані Si і Mn (хромансил), наприклад 30ХГС, добре зварюються після термообробки. Для великих відповідальних і важконавантажених деталей складної форми використовують сталі зі значним вмістом Ni та Mo, наприклад, Сталь 40ХНМ; 30ХН2МФ; 40ХН2МФ; 40ХН2МА; 38ХН3МФ тощо.

Пружинно-ресорні леговані сталі містять 0,5-0,7 % С, додатково леговані Si (до 2 %) і елементами Mn, Cr, V, W, B, які підвищують пружні характеристики і прогартуваність сталі. Сталі 50С2, 50ХГФ використовують для ресор автомобілів, сталі 55СГ, 60СГ, 65С2ВА, 60С2ХФА – для відповідальних пружин, ресор тощо. Додаткове легування сталі вольфрамом, молібденом, ванадієм підвищує стійкість сталі під час відпуску, що дозволяє використовувати їх для роботи при температурах до 200...250 °С. При легуванні бором (0,003 %) підвищується поріг пружності і прогартуваність сталі (сталі 55ХГР, 50ХФРА тощо). Для підвищення опору втомі і зменшення

чутливості до концентраторів напружень пружини і листи ресор у готовому вигляді піддають поверхневому наклепуванню струменевою обробкою шротом. Шарикопідшипникові сталі складають особливу групу конструкційних сталей, що відповідають вимогам високої міцності і зносостійкості. Для них характерним є високий вміст вуглецю (>1 %) і хрому. Для маркування цих сталей використовують літери ШХ, які розшифровуються як сталь шарикопідшипникова хромиста, далі йдуть цифри, що вказують на вміст хрому в десятих частках відсотку. Наприклад, Сталь ШХ6; ШХ9; ШХ15.

Евтектоїдний (0,8%) вміст вуглецю і хрому забезпечують одержання після гартування структури дисперсного мартенситу з карбідами високої твердості, зносостійкість і прогартованість сталі. Для підвищення прогартованості сталь додатково легують марганцем і кремнієм (Сталь ШХ15СТ; ШХ20СГ).

2. Інструментальні леговані сталі використовують для виготовлення різального, штампувального і вимірюваного інструменту. Умовно їх поділяють на леговані, штамповані та швидкорізальні. Інструментальні леговані сталі, порівняно з вуглецевими, характеризує підвищена прогартованість, значна міцність, більш високі різальні властивості, пластичність у відпаленому стані. Легуючі елементи W, Mo, Co, Cr підвищують теплостійкість, Mn – загартованість, Ni – в'язкість, V – зносостійкість. Сталі з сумарним вмістом легуючих елементів до 2,5 % відносять до низьколегованих, до 10% – до середньолегованих і більше 10% - до високолегованих. У низьколегованих сталях (C = 0,9...1,3%) основним легуючим елементом є хром (Сталь X; 11X; 13X). При вмісті хрому до 0,4 % прогартованість сталей низька, а з підвищенням вмісту хрому до 1,3 ... 1,6 % при легуванні кількома елементами (Cr, Mn, Si, W) вона значно зростає (Сталь 9XC; 9XBГ; XBГ; X12M тощо).

Сталь X з теплостійкістю до 200 °C застосовують для токарних і стругальних різців. Сталь 9XC з теплостійкістю до 260 °C – для виготовлення свердел, розверток, фрез, мітчиків, плашок; сталі типу XBСГ; 9X5BФ з теплостійкістю до 450°C – для виготовлення крупних свердел, плашок, протяжок, фрез та іншого різального інструменту. Високолеговані інструментальні сталі містять C (0,75...1,1%), W, Cr, V, Mo (до 18 % основного легуючого елемента) і мають високу теплостійкість – до 600...650 °C. Такі сталі називають швидкорізальними, позначають літерою P і цифрою, яка вказує на вміст вольфраму у відсотках, наприклад, Сталь P9; P18. Вміст хрому 4 % і ванадію 2 % при маркуванні цих сталей не вказують. До складу швидкорізальних сталей додатково вводять також молібден і кобальт. Для маркування таких сталей використовують літери M і K та цифри, які вказують на їх кількість у відсотках (Сталь P6M5; P9K5; P18K5Ф2 тощо). Для вимірювального інструменту використовують сталі X, XBГ після гартування і спеціального низького відпуску при 120...130 °C протягом 15...20 год з наступною обробкою при температурах нижче нуля (до - 60 °C). З цих сталей виготовляють штампи холодного деформування складної форми перерізом 75...100 мм.

Для виготовлення інструменту з високою твердістю і зносостійкістю, а також незначною деформацією під час гартування використовують сталі типу Х12Ф1.

Сталі з меншим вмістом вуглецю і підвищеною в'язкістю використовують для інструменту, що працює в умовах значних ударних навантажень (пневматичні зубила, ножі для холодної різки тощо), наприклад, Сталь 4ХС; 6ХС; 4ХВ2С та ін.

Сталі 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ з вмістом вуглецю 0,5...0,6 % леговані хромом, який підвищує міцність і прогартованість, а також вольфрамом і молібденом, які підвищують твердість, теплостійкість, подрібнюють зерно, нікелем який підвищує в'язкість, прогартованість і марганцем, який замінює нікель, використовують для виготовлення штампів гарячого деформування. Сталі з особливими властивостями (спеціальні леговані жароміцні, теплостійкі, зносостійкі, нержавіючі, з особливими магнітними або електричними властивостями тощо), мають певні, різко визначені властивості.

ТЕМА № 15 Класифікація, маркування та призначення іноземних сталей та сплавів

Основні принципи класифікації та маркування сталей у Сполучених Штатах Америки

Технічні суспільства, асоціації та інститути, члени яких розробляють, виготовляють або купують сталеві вироби, видають стандартні специфікації. Деякі з найбільш важливих специфікацій наведено нижче:

1. Товариство автомобільних інженерів (SAE).
2. Американський інститут заліза та сталі (AISI).
3. Специфікація космічних матеріалів (AMS).
4. Асоціація американських залізниць (AAR).
5. Американське бюро суднобудування (ABS).
6. Американський нафтовий інститут (API).
7. Американська асоціація розробників залізниць (AREA).
8. Американське товариство інженерів-механіків (ASME).
9. Американське товариство з випробувань і матеріалів (ASTM).

Уніфікована номерна система класифікації матеріалів (UNS) була розроблена Американським товариством з випробувань і матеріалів (ASTM), товариством автомобільних інженерів (SAE) та іншими технічними товариствами, торговельними асоціаціями, а також агентствами уряду Сполучених Штатів. Номер UNS означає хімічний склад матеріалу, а не специфікацію, і призначений для кожного хімічного складу металевого сплаву. Позначення сплаву за системою UNS складається з букви і п'яти цифр. Букви вказують на клас сплавів, а цифри визначають хімічний склад сплавів у межах цього класу.

SAE-AISI система розроблена товариством автомобільних інженерів і американським інститутом заліза та сталі. Це найбільш широко використовувана система класифікації. SAE – AISI система використовується до поковок, гаряче- і холоднокатаного металу, катанки, трубних та листових матеріалів, а також до литва. Основні групи сталей відповідно до класифікації SAE – AISI наведені в табл. 15.1.

Високоміцні низьколеговані (HSLA) сталі. Приклади HSLA сталей наведено в табл. 15.2.

Вуглецеві сталі містять $Mn < 1,65 \%$, $Si < 0,60 \%$ і $Cu < 0,60 \%$. Вони включені в 1xxx групи в SAE-AISI системі та розділені на чотири серії за властивостями. Приклади кількох простих вуглецевих сталей 10xx групи наведені в табл. 15.3.

Таблиця 15.1 – Основні групи сталей за американською (США) класифікацією SAE-AISI

Позначення	Тип сталі	Вміст легуючих елементів, %
10xx*	Вуглецеві	Прості ($Mn < 1,00$)
11xx		Леговані сіркою 0,1-0,2
12xx		Леговані сіркою та фосфором
15xx		Прості ($Mn = 1,00-1,65$)
13xx	Марганцеві	$Mn \approx 1,75$
23xx	Нікелеві	$Ni \approx 3,50$
25xx		$Ni \approx 5,00$

40xx	Молібденові	Mo = 0,20-0,25
44xx		Mo = 0,40-0,52
50xx	Хромисті	Cr = 0,27-0,65
51xx		Cr = 0,80-1,05
501xx	Хромисті (підшипникові)	C > 1,00; Cr > 0,5
511xx		C > 1,00; Cr > 1,02
521xx		C > 1,00; Cr > 1,45
31xx	Хромонікелеві	Ni ≈ 1,25; Cr = 0,65-0,80
32xx		Ni » 1,75; Cr » 1,07
33xx		Ni » 3,50; Cr = 1,50-1,57
34xx		Ni » 3,00; Cr » 0,77
41xx	Хромомолібденові	Cr = 0,50-0,95; Mo = 0,12-0,30
46xx	Нікельмолібденові	Ni = 0,85-1,82; Mo = 0,20-0,25
48xx		Ni ≈ 3,50; Mo ≈ 0,25
61xx	Хромованадієві	Cr = 0,60-0,95; V = 0,10-0,15
72xx	Вольфрамохромисті	W ≈ 1,75; Cr ≈ 0,75
92xx	Кремнієвомарганцевисті	Si=1,4-2; Mn=0,65-0,85; Cr<0,65
9xx	Високоміцні низьколеговані	Разні типи SAE
xxVxx	Бористі сталі	B - сталь містить бор
xxLxx	Сталі леговані свинцем	L - сталь містить свинець
43xx	Нікель-хром-молібденові	Ni ≈ 1,82; Cr = 0,50 - 0,80; Mo ≈ 0,25
43Vxx		Ni ≈ 1,82; Cr ≈ 0,50; Mo = 0,12-0,25; V>0,03
47xx		N ≈ 1,05; Cr ≈ 0,45; Mo = 0,2-0,35
81xx		Ni ≈ 0,30; Cr ≈ 0,40; Mo ≈ 0,12
86xx		Ni ≈ 0,55; Cr ≈ 0,50; Mo ≈ 0,20
87xx		Ni ≈ 0,55; Cr ≈ 0,50; Mo ≈ 0,25
88xx		Ni ≈ 0,55; Cr ≈ 0,50; Mo ≈ 0,35
93xx		Ni ≈ 3,25; Cr ≈ 1,20; Mo ≈ 0,12
94xx		Ni ≈ 0,45; Cr ≈ 0,40; Mo ≈ 0,12
97xx		Ni ≈ 0,55; Cr ≈ 0,20; Mo ≈ 0,20
98xx		Ni ≈ 1,00; Cr ≈ 0,80; Mo ≈ 0,25

*Останні дві цифри вказують на середній вміст вуглецю (у сотих частках %).

Таблиця 15.2 – Хімічний склад високоміцних низьколегованих сталей(HSLA) виробництва США за класифікацією SAE

Номер SAE (b)	Хімічний склад, % (a)		
	C max	Mn max	P max
942X	0,21	1,35	0,04
945X	0,22	1,35	0,04
950X	0,23	1,35	0,04
955X	0,25	1,35	0,04
960X	0,26	1,45	0,04
965X	0,26	1,45	0,04
970X	0,26	1,65	0,04
980X	0,26	1,65	0,04

Примітка. а – максимальний вміст S < 0,05 %, Si < 0,90 %. b – друга та третя цифри номера показують мінімальну межу текучості в ksi (1ksi= 6,875 МПа). Буква X вказує, що сталь містить Nb, V, N та інші елементи.

Таблиця 15.3 – Хімічний склад вуглецевих сталей, що використовуються як напівфабрикати для обробки тиском, гарячої та холодної прокатки заготовок, катанки, сортового профілю, листа, стрічки, безшовних і зварних труб

Номер UNS	Номер SAE- AISI	Хімічний склад, %				Призначення
		C	Mn	P max	S max	
G10100	1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,050	Деталі машин, механізмів, верстатів і конструкцій низької міцності
G10200	1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050	Деталі конструкцій, що працюють при невисоких напругах
G10300	1030	0,28-0,34	0,60-0,90	0,040	0,050	Автомобільні і транспортні пристрої, машинобудування
G10400	1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,040	0,050	
G10500	1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,040	0,050	Вали, осі, шпинделі, штифти, штирі болти, гвинти, шурупи
G10600	1060	0,55-0,65	0,60-0,90	0,040	0,050	
G10700	1070	0,65-0,75	0,60-0,90	0,040	0,050	Холоднокатана смуга для пружин і ресор високої розмірної точності і низької шорсткості

Примітки. 1. Вміст кремнію визначається вимогами замовника і може знаходитися у таких межах, %:

– для заготовок і напівфабрикатів < 0,15±0,08; 0,15 - 0,20±0,1; 0,20 - 0,30±0,15; 0,30 - 0,60±0,2;

– для катанки < 0,10; 0,07 - 0,15; 0,10 - 0,20; 0,15 - 0,35; 0,20 - 0,40; 0,30 - 0,60.

2. Сталі, можуть вироблятися з добавкою свинцю у кількості Pb = 0,15 - 0,35%, що позначається буквою L у середині номера, наприклад 10L45.

3. Сталі можуть вироблятися з добавкою бору у кількості B = 0,0005 - 0,003%, що позначається буквою B у середині номера, наприклад 10B46.

В таблиці 15.4 наведені позначення для сортових торговельних сталей. Їх марка починається з літери M, що означає „merchant” – комерційний або торговельний.

Вуглецеві сталі, леговані сіркою (11xx група), наведені в табл. 15.5, а вуглецеві сталі, леговані сіркою і фосфором (12xx група) – у табл. 15.6. Сталі цієї групи легко обробляються різанням.

У таблиці 15.7 наведені сталі, що мають вміст марганцю від 0,9 до 1,5 %, без додаткових легуючих добавок. Ці сталі мають позначення 15xx.

Сталі підвищеної прогартованості мають в марці додаткову букву H. Як і у вуглецевих сталях, буква B вставлена між другою і третьою цифрами вказує, що сталь містить бор. Буква E на початку марки показує, що сталь виплавлена в електричних печах.

Леговані сталі. Хімічний склад легованих сталей наведено у табл. 15.8.
AMS класифікація. Декілька легованих сталей наведені в табл. 15.3.

Таблиця 15.4 – Хімічний склад сортових торгових сталей

Номер SAE-AISI	Хімічний склад, %				Призначення
	C	Mn	P max	S max	
M1008	0,10 max	0,25-0,60	0,040	0,050	Деталі конструкцій, що працюють при невисоких напруженнях
M1010	0,07-0,14	0,25-0,60	0,040	0,050	Деталі машин, механізмів, верстатів і конструкцій низької міцності
M1012	0,09-0,16	0,25-0,60	0,040	0,050	Деталі конструкцій, що працюють при невисоких напруженнях
M1015	0,12-0,19	0,25-0,60	0,040	0,050	Невеликі деталі машин, важелі, шарніри, куліси, ланки, втулки, вкладиші, букси, гільзи, болти,
M1017	0,14-0,21	0,25-0,60	0,040	0,050	гвинти; шурупи, пробійники, пальці, штифти, шворні, осі, цапфи, шплінти
M1020	0,17-0,24	0,25-0,60	0,040	0,050	Деталі конструкцій, що працюють при невисоких напруженнях
M1023	0,19-0,27	0,25-0,60	0,040	0,050	Автомобільні і транспортні пристрої, машинобудування
M1025	0,20-0,30	0,25-0,60	0,040	0,050	
M1031	0,26-0,36	0,25-0,60	0,040	0,050	

Таблиця 15.5 – Хімічний склад сталей, легованих сіркою, що легко обробляються різанням

Номер UNS	Номер SAE AISI	Хімічний склад, %				Призначення
		C	Mn	Pmax	S	
G11080	1108	0,08-0,13	0,50-0,80	0,040	0,08-0,13	Цементована сталь
G11100	1110	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,08-0,13	
G11170	1117	0,14-0,20	1,00-1,30	0,040	0,08-0,13	
G11180	1118	0,14-0,20	1,30-1,60	0,040	0,08-0,13	
G11370	1137	0,32-0,39	1,35-1,65	0,040	0,08-0,13	
G11390	1139	0,35-0,43	1,35-1,65	0,040	0,13-0,20	Термічно оброблена сталь
G11400	1140	0,37-0,44	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13	
G11410	1141	0,37-0,45	1,35-1,65	0,040	0,08-0,13	
G11440	1144	0,40-0,48	1,35-1,65	0,040	0,24-0,33	
G11460	1146	0,42-0,49	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13	
G11510	1151	0,48-0,55	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13	

Примітки. 1. Вміст кремнію в катанці для сталей SAE1110 (включно) менше 0,10%. 2. Для сталей класу SAE1117 і вище вміст кремнію може бути 0,10%; 0,10...0,20%; 0,15...0,35%.

Таблиця 15.6 – Хімічний склад американських сталей, легованих сіркою і фосфором, що легко обробляються різанням

Номер UNS	Номер SAE AISI	Хімічний склад, %					Призначення
		C (max)	Mn	P	S	Pb	
G12110	1211	0,13	0,60- 0,90	0,07- 0,12	0,10- 0,15	-	Середньонавантажені сталі
G12120	1212	0,13	0,70- 1,00	0,07- 0,12	0,16- 0,23	-	
G12130	1213	0,13	0,70- 1,00	0,07- 0,12	0,24- 0,33	-	Важконавантажені сталі
G12150	1215	0,09	0,75- 1,05	0,04- 0,09	0,26- 0,35	-	
G12144	12L14	0,15	0,85- 1,15	0,04- 0,09	0,26- 0,35	0,15- 0,35	Важконавантажені стаї, л що містять свинець

Таблиця 15. 7 – Хімічний склад американських високомарганцявистих вуглецевих сталей

Номер UNS	Номер SAE/AISI	Хімічний склад, %				Призначення
		C	Mn	P max	S max	
G15130	1513	0,10-0,16	1,10- 1,40	0,040	0,050	Оброблені тиском і зварювані машинобудівні деталі
G15220	1522	0,18-0,24	1,10- 1,40	0,040	0,050	
G15240	1524	0,19-0,25	1,35- 1,65	0,040	0,050	
G15260	1526	0,22-0,29	1,10- 1,40	0,040	0,050	
G15270	1527	0,22-0,29	1,20- 1,50	0,040	0,050	
G15360	1536	0,30-0,37	1,20- 1,50	0,040	0,050	
G15410	1541	0,36-0,44	1,35- 1,65	0,040	0,050	
G15480	1548	0,44-0,52	1,10- 1,40	0,040	0,050	Вали, осі, шпинделі, облямовування, штифти, штирі і диски великих поперечних перерізів
G15510	1551	0,45-0,56	0,85- 1,15	0,040	0,050	
G15520	1552	0,47-0,55	1,20- 1,50	0,040	0,050	
G15610	1561	0,55-0,65	0,75- 1,05	0,040	0,050	
G15660	1566	0,60-0,71	0,85- 1,15	0,040	0,050	

Таблиця 15.8 – Хімічний склад легованих сталей виробництва США

Номер UNS	Номер SAE AISI	Хімічний склад, % (a)									Призначення
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	
Марганцевисті сталі											
G13300	1330	0,28-0,33	1,6-1,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	-	-	Деталі конструкцій для загального машино-будування
G13350	1335	0,33-0,38	1,6-1,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	-	-	Вали, осі, шпинделі, штифти, штирі і диски великих поперечних перерізів
G13400	1340	0,38-0,43	1,6-1,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	-	-	
Молібденові сталі											
G40230	4023	0,20-0,25	0,7-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	-	-	Труби високого тиску з товстими стінками, невеликі поковки (температура роботи нижче 530 °C)
G40370	4037	0,35-0,40	0,7-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	0,20-0,30	-	
G40470	4047	0,45-0,50	0,7-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	0,20-0,30	-	
G44220	4422	0,20-0,25	0,7-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	0,35-0,45	-	
G44270	4427	0,24-0,29	0,7-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	-	0,35-0,45	-	
Хромисті сталі											
G50401	50B40	0,38-0,43	0,75-1,0	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,40-0,60	-	-	Листові ресори, спіральні пружини і торсіони
G50501	50B50(c)	0,48-0,53	0,75-1,0	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,40-0,60	-	-	
G50601	50B60(c)	0,56-0,64	0,75-1,0	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,40-0,60	-	-	Зубчасті колеса невеликого розміру, вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, карданні шарніри, деталі для контролю
G51150	5115	0,13-0,18	0,70-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,70-0,90	-	-	
G51350	5135	0,33-0,38	0,60-0,8	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,80-1,05	-	-	Деталі зубчастих передач, поршні, плунжера, колінчасті вали (для холодної обробки тиском)

Хромисті (підшипникові) сталі											
G50986	50100(b)	0,98-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,15-0,35	-	0,40-0,60	-	-	Кульки, циліндри, ролики, вали, бігунки, голки, що обертаються, Ø до 10 мм
G51986	51100(b)	0,98-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,15-0,35	-	0,90-1,15	-	-	Кульки, циліндри, ролики, вали, бігунки, шарніри, куліси, що обертаються, Ø від 10 до 17 мм
G52986	52100(b)	0,98-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,15-0,35	-	1,30-1,60	-	-	Кульки, циліндри, ролики, вали, бігунки, шарніри, куліси, пластини, диски, що обертаються, Ø до 30 мм Кремніємарганцевисті сталі
G92540	9254	0,51-0,59	0,60-0,80	0,035	0,040	1,20-1,60	-	0,60-0,80	-	-	Листові ресори, спіральні і тарілчасті пружини
G92600	9260	0,56-0,64	0,75-1,00	0,035	0,040	1,80-2,20	-	-	-	-	Листові ресори (товщиною ³ 7 мм) для транспортних засобів, спіральні пружини
Хромомолібленові сталі											
G41180	4118	0,18-0,23	0,70-0,90	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,40-0,60	0,08-0,15	-	Деталі зубчастих передач всіх типів, шарнірні деталі, вали, осі, шпинделі, штифти, болти, гвинти, шурупи, втулки, вкладиші, букси, гільзи, з'єднувальні муфти
G4140	4140	0,38-0,43	0,70-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-	Зубчасті колеса, шестерні, шатуни, з'єднувальні штоки і тяги
G41610	4161	0,56-0,64	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,70-0,90	0,25-0,35	-	Втулки, вкладиші, букси, гільзи, вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, деталі для контролю, шарніри, куліси

Нікель – молибденові сталі											
G46150	4615	0,13-0,18	0,45-0,65	0,035	0,040	0,15-0,25	1,65-2,00	0,20-0,30	-	-	Шестерні, напівосі сателіти, шарніри
G46200	4620	0,17-0,22	0,45-0,65	0,035	0,040	0,15-0,35	1,65-2,00	-	0,20-0,30	-	
G46260	4626	0,24-0,20	0,45-0,65	0,035	0,040	0,15-0,35	0,70-1,00	-	0,15-0,25	-	
G48150	4815	0,13-0,18	0,40-0,60	0,035	0,040	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-	Шестерні, напівосі сателіти, шарніри
G48170	4817	0,15-0,20	0,40-0,60	0,035	0,040	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-	
G48200	4820	0,18-0,23	0,50-0,70	0,035	0,040	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-	
Хромованадієві сталі											
G61180	6118	0,16-0,21	0,50-0,70	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,50-0,70	-	0,10-0,15	Листові ресори, спіральні і тарілчасті пружини, торсіони Ø 40 мм.
G61500	6150	0,48-0,53	0,7-0,9	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,80-1,1	-	0,15 min	Вали, осі, шпинделі великих зубчастих передач, великі зубчасті колеса, шестерні
Нікель – хромомолібденові сталі											
G43200	4320	0,17-0,22	0,45-0,65	0,035	0,040	0,15-0,35	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	-	Зубчасті колеса, зірочки й інші деталі для автомобілебудування
G43400	4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,035	0,040	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	-	
G43400	E4340	0,38-0,43	0,65-0,85	0,025	0,040	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	-	
G47180	4718	0,16-0,21	0,70-0,90	-	-	-	0,90-1,2	0,35-0,5	0,30-0,40	-	
G47200	4720	0,17-0,22	0,50-0,70	0,035	0,040	0,15-0,35	0,90-1,20	0,35-0,55	0,15-0,25	-	Зубчасті колеса, зірочки й інші деталі для

G81150	8115	0,13-0,18	0,70-0,90	0,035	0,040	0,15-0,35	0,20-0,40	0,30-0,50	0,08-0,15	-	автомобілебудування
G81451	81B45(c)	0,43-0,48	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,20-0,40	0,35-0,55	0,08-0,15	-	
G86150	8615	0,13-0,18	0,70-0,90	0,035	0,040	0,15-0,35	0,4-0,7	0,4-0,6	0,15-0,25	-	
G86370	8637	0,35-0,40	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,4-0,7	0,4-0,6	0,15-0,25	-	
G86660	8660	0,56-0,64	0,70-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,4-0,7	0,4-0,6	0,15-0,25	-	
G87200	8720	0,18-0,23	0,70-0,90	0,035	0,040	0,15-0,35	0,4-0,7	0,4-0,7	0,4-0,6	0,20-0,30	
G87400	8740	0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,4-0,7	0,4-0,7	0,4-0,6	0,20-0,30	
G88220	8822	0,20-0,25	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,4-0,7	0,4-0,6	0,30-0,40	-	Деталі для загального машинобудування, приладів, інструментів, апаратів, апаратури, агрегатів, двигунів і транспортних засобів,
G93100	9310 (b)	0,08-0,13	0,45-0,65	0,025	0,025	0,15-0,35	3,00-3,5	1,00-1,40	0,08-0,15	-	
G94151	94B15 (c)	0,13-0,18	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,08-0,15	-	
G94171	94B17 (c)	0,15-0,2	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,08-0,15	-	
G94301	94B30 (c)	0,28-0,33	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,08-0,15	-	

Примітка. а - невказаний в специфікації вміст деяких хімічних елементів (мала кількість) може бути таким: Сu < 0,35%; Ni < 0,25; Cr < 0,20; Мо < 0,06%; б – виплавка сталі в електричних печах; с – вміст бору 0,0005 – 0,003%

Таблиця 15.9 – Хімічний склад легованих сталей за американською класифікацією AMS

Номер ASM	Вид виробів	Хімічний склад, %					Найближчий номер SAE-AISI	Номер UNS
		C	Cr	Ni	Mo	Другі		
6250H	Заготовки, поковки, труби	0,07-0,13	1,5	3,5	-	-	3310	K44910
6255	Заготовки, поковки, труби (P, DVM)	0,16-0,22	1,45	-	1,0	1,1 Si 0,08Al	CBS 600	K21940
6256A	Заготовки, поковки, труби (P, DVM)	0,10-0,16	1,0	3,0	4,5	0,08Al, 0,38V	CBS 1000M	K71350
6260K	Заготовки, поковки, труби (цементация)	0,07-0,13	1,2	3,2	0,12	-	9310	G93106
6263 G	Заготовки, поковки, труби (цементация)	0,11-0,17	1,2	3,2	0,12	-	9315	-
6530H	Суцільнотягнуті труби	0,28-0,33	0,55	0,5	0,2	-	8630	G86300
6535G	Суцільнотягнуті труби	0,28-0,33	0,5	0,55	0,20	-	8630	G86300
6543A	Заготовки, поковки (обробка на твердий розчин)	0,10-0,14	2,0	10,0	1,0	8,0 Co	-	K91970
6544A	Листи (обробка на твердий розчин, VM)	0,10-0,14	2,0	10,0	1,0	0,8 Co	-	K92571
6546C	Плити, листи, стрічка (відпал, P, CM)	0,24-0,30	0,48	8,0	0,48	4,0 Co 0,09 V	HP 9-4-25	K92571
6550H	Зварні труби	0,28-0,33	0,55	0,50	0,2	-	8630	G86300

Примітка. P – якість „преміум”; DVM – подвійна дугова плавка; VM – вакуумна плавка; CM – переплав плавкого електрода

Приклади маркування та класифікації сплавів провідних промислових країн світу

Німецька класифікація (DIN). Розроблена інститутом Deutsches Institut für Normung. Використовують чисельні або чисельні та буквенні ознаки. Приклади сталей надано в табл. 15.10.

Японська класифікація (JIS) розроблена комітетом японських промислових стандартів міністерства міжнародної торгівлі та промисловості. JIS класифікація починається з заголовних букв JIS з наступною буквою, що позначає вид виробу (наприклад, буква G позначає вуглецеві та низьколеговані сталі). JIS позначення даються в табл. 15.11.

Таблиця 15.10 – Хімічний склад сталей за німецькою класифікацією **DIN**

Номер DIN	Хімічний склад, %									Найближчий номер SAE-AISI	Призначення
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Інші хімічні елементи		
1.1820, C85W	0,50-0,58	0,15	0,30-0,50	0,030	0,030	-	-	-	-	1055	Вали, осі, шпинделі
1.1830, C85W	0,80-0,90	0,25-0,040	0,50-0,80	0,025	0,02	-	-	-	-	1084	Циркулярні пили, рами і станини циркулярних пил для робіт по дереву, молотки
1.7238, 49CrMo4	0,46-0,52	0,15-0,40	0,50-0,80	0,025	0,025	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-	4147	Деталі для транспорту і машинобудування
1.7264, 20CrMo5	0,18-0,23	0,15-0,35	0,90-1,20	0,035	0,035	-	1,10-1,40	0,20-0,40	-	4118	Зносостійкі важко – навантажені колінчасті вали, зубчасті колеса і шестерні
1.81159, GS-50CrV4	0,47-0,55	0,15-0,40	0,70-1,10	0,035	0,035	-	0,90-1,20	-	0,10-1,20V	6150	Вали, осі, шпинделі великих зубчастих передач, великі зубчасті колеса, шестерні

Таблиця 15.11 – Хімічний склад сталей за японською класифікацією JIS

Номер JIS	Хімічний склад, %									Найближчий номер SAE-AISI	Призначення
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mn	Інші		
G3445-труби											
STKM11A(11A)	0,12	0,35	0,60	0,040	0,040	-	-	-	-	1008	Деталі машин, механізмів, верстатів і конструкцій низької міцності
STKM15A(15A)	0,25-0,35	0,35	0,30-1,00	0,040	0,040	-	-	-	-	1029	
STKM17A(17A)	0,45-0,55	0,40	0,40-1,00	0,040	0,040	-	-	-	-	1049	Деталі для автомобілів, двигунів та ін. виробів машинобудування
G4051- вуглецеві сталі											
F15Ck	0,13-0,18	0,15-0,35	0,30-0,60	0,025	0,025	0,20	0,20	-	0,25 Cu, Ni+Cr=0,30	1015	Невеликі деталі машин, важелі, втулки, вкладиші; букси, гільзи, болти, гвинти; шурупи, пробійники, пальці, штифти, шворні, осі, цапфи, шийки, шплінти
S9Ck	0,07-0,12	0,15-0,35	0,15-0,35	0,025	0,025	-	-	-	-	1010	Деталі машин і механізмів низької міцності
G4052-конструкційні сталі з заданою прогартованістю											
SCr4H, Scr440H	0,37-0,44	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,25	-	-	5140	Вали, осі, шпинделі, шийки осей, деталі для контролю
SCre21H, SCre415H	0,12-0,18	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,20	-	-	5115	Зубчасті колеса невеликого розміру, вали, осі, шпинделі, штифти, карданні шарніри
SCr2H, SCr430H	0,27-0,34	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,25	-	-	5130	Колеса, вали., осі, шпинделі

SCr420H	0,17-0,23	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,25	-	-	5120	Зубчасті колеса середнього розміру, вали, осі, шпинделі, штифти
SCM4H, SCM440H	0,37-0,44	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,25	-	-	4140	Зубчасті колеса, шестерні, шатуни, сполучні шток и і тяги
SUP7	0,55-0,65	1,80-2,20	0,70-1,00	0,035	0,035	-	-	-	-	9260	Листові ресори (товщиною ³ 7 мм), спіральні пружини
SUP9	0,50-0,60	0,15-0,35	0,65-0,95	0,035	0,035	-	0,65-0,95	-	-	5155	Пружини високої напруги або тиску
SUP10	0,45-0,55	0,15-0,35	0,65-0,95	0,035	0,035	-	0,80-1,10	-	0,15-0,25V	6150	Шестерні, шарнірні деталі, зубчасті колеса, вали, осі, шпинделі,
G5111- сталі для литва											
CMnCr4	0,35-0,45	0,30-0,60	1,20-1,60	0,040	0,040	-	0,40-0,80	-	-	50B40	Деталі для транспортних і рухомих пристроїв
SCMnCr3	0,30-0,40	0,30-0,60	1,20-1,60	0,040	0,040	-	0,20	0,15-0,35	-	4032	

Таблиця – 15.12 Хімічний склад сталей за класифікацією Великої Британії BS

Номер BS	Хімічний склад, %									Найближчий номер SAE-AISI	Призначення
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Інші		
970- вуглецеві та вуглецево-марганцеві сталі, що легко піддаються обробці різанням											
015A03	0,06	0,10-0,40	0,40	0,050	0,050	-	-	-	-	1005	Невеликі деталі машин, важелі, втулки, вкладиші; букси, гільзи, болти, гвинти; шурупи, пробійники, пальці, штифти, шворні, осі, цапфи, шийки, шплінти
030A04	0,08	0,10-0,40	0,20-0,40	0,050	0,050	-	-	-	-	1006	
040A15	0,13-0,18	0,40	0,30-0,50	0,050	0,050	-	-	-	-	1015	
040A17	0,15-0,20	0,40	0,30-0,50	0,050	0,050	-	-	-	-	1017	
3601– трубні сталі											
360	0,17	0,35	0,40-0,60	0,045	0,045	-	-	-	-	1013	Труби
3100 – ливарні сталі											
A5	0,25-0,33	0,6	1,20-1,60	0,050	0,050	-	-	-	-	1527	Деталі когстркцій для загального машинобудування
AW2	0,40-0,50	0,36	1,00	0,050	0,050	0,25Cr, 0,40Ni, 0,30Cu, 0,15Mo				1046	
AW3	0,50-0,60	0,60	1,00	0,050	0,050	0,25Cr, 0,40Ni, 0,30Cu, 0,15Mo				1055	Вали-шестерні, колеса
BW3	0,45-0,53	0,75	0,50-1,00	0,060	0,06	-	0,80-1,20	-	-	5147,5150	Деталі конструкцій загального машинобудування
BW4	0,55-0,65	0,75	0,50-1,00	0,060	0,060	-	0,80-1,50	0,20-0,40	-	4161	
3111 – дрiт											
Тип 2/1	0,35-0,40	0,15-0,40	0,70-0,90	0,04	0,04	-	-	0,20-0,30	-	4037	Дрiт
Тип 2/2	0,32-0,45	0,15-0,40	0,80-1,00	0,04	0,04	-	-	0,20-0,30	-	4037	
Тип 3	0,35-0,45	0,15-0,35	0,80-1,10	0,040	0,040	-	0,90-1,20	-	-	5135, 5140	
Тип 9	0,17-0,23	0,15-0,35	0,80-1,10	0,040	0,040	0,021Al, 0,0008-0,003B			-		
970 – леговані сталі											

527A17	0,14-0,19	0,10-0,35	0,70-0,90	0,035	0,040	- 0,70 - 0,90	-	-	-	5115	Колеса, вали, осі, шпинделі
530A30 (Em18A)	0,28-0,33	0,10-0,35	0,60-0,80	0,040	0,050	-	0,90-1,20	-	-	5130	
530A32 (En18B)	0,30-0,35	0,10-0,35	0,60-0,80	0,040	0,050	-	0,90-1,20	-	-	5132	
530A40 (En18D)	0,29-0,35	0,10-0,35	0,50-0,80	0,040	0,050	-	0,80-1,25	-	-	5140	
2772 – шахтне та підйомно-транспортне устаткування											
806M22	0,19-0,25	0,10-0,35	0,60-0,95	0,04	0,05	0,35-0,75	0,35-0,65	0,15-0,25	-	8622	Шахтне та підйомно- транспортне устаткування

Таблиця 15.13 Хімічний склад сталей за французькою класифікацією AFNOR

Номер AFNOR	Хімічний склад, %									Найближчий номер SAE-AISI	Призначення
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Інші		
AF34	0,12	0,30	0,30-0,60	0,040	0,040	-	-	-	-	1010	Деталі машин і конструкцій низької міцності
AF37	0,08-0,15	0,30	0,30-0,60	0,040	0,040	-	-	-	-	1012	
AF42	0,14-0,21	0,10-0,40	0,50-0,80	0,040	0,040	-	-	-	-	1018	
AF50	0,25-0,33	0,10-0,40	0,50-0,80	0,040	0,040	-	-	-	-	1029	
AF50-S	0,20	0,55	1,50	0,040	0,040	-	-	-	-	1513	
AF55	0,31-0,39	0,10-0,40	0,50-0,80	0,040	0,040	-	-	-	-	1035	Деталі машин і конструкцій підвищеної міцності
A35-551 – цементуємі сталі											
16MC5	0,14-0,19	0,10-0,40	1,00-1,30	0,035	0,035	-	0,80-1,10	-	-	5115, 5117	Зубчасті колеса невеликого

												розміру, вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, карданні шарніри
19NCDB 2	0,17-0,23	0,10-0,40	0,65-1,30	0,035	0,035	0,40-0,70	0,40-0,65	0,15-0,25	0,0008-0,005B	8620	Деталі передавальних механізмів і приводів	
20MC5	0,17-0,22	0,10-0,40	1,10-1,40	0,035	0,035	-	1,00-1,30	-	-	5120	Зубчасті колеса середнього розміру, вали, осі, шпинделі, облямовування, штифти, штирі, для транспортного машинобудування	
20NCD2	0,17-0,25	0,10-0,40	0,65-0,95	0,035	0,035	0,40-1,00	0,40-0,65	0,15-0,25	-	8620	Деталі передавальних механізмів і приводів	
A35-552 – напівфабрикати, заготовки, катанка												
SCr4H SCr440H	0,37-0,44	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,25	-	-	8620	Деталі передавальних механізмів і приводів	
20MC5	0,12-0,18	0,15-0,35	0,55-0,90	0,030	0,030	-	0,85-1,20	-	-	5120	Зубчасті колеса середнього розміру, вали, осі, шпинделі, облямовування, штифти, штирі, для транспортного машинобудування	

Таблиця 15.14 – Хімічний склад сталей за італійською класифікацією UNI

Номер UNI	Хімічний склад, %										Найближчий номер	Призначення
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Інші			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
C45	0,42-0,50	0,15-0,40	0,40-0,90	0,035	0,035	-	-	-	-	1045	Автомобілі і транспортні пристрої, машинобудування	
C60	0,57-0,65	0,15-0,40	0,50-0,90	0,035	0,035	-	-	-	-	1060	Вали, осі, шпинделі, облямовування, штифти, штирі, болти, гвинти, шурупи	
3545 – пружні сталі												
C10	0,07-0,12	0,35	0,35-0,60	0,035	0,035	-	-	-	-	1010	Деталі машин, механізмів, верстатів і конструкцій низької міцності	
C16	0,12-0,18	0,35	0,30-0,70	0,035	0,035	-	-	-	-	1015		
C20	0,18-0,24	0,40	0,40-0,80	0,035	0,035	-	-	-	-	1021	Деталі конструкцій, що працюють при невисоких напруженнях	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C30	0,27-0,34	0,40	0,50-0,90	0,035	0,035	-	-	-	-	1030	Автомобільні і транспортні пристрої машинобудування
C35	0,33-0,38	0,35	0,40-0,65	0,020	0,020	-	-	-	-	1035	
C40	0,37-0,44	0,40	0,50-0,90	0,035	0,035	-	-	-	-	1040	
C70	0,65-0,72	0,15-0,40	0,50-0,90	0,035	0,035	-	-	-	-	1070	Холоднокатана смуга для пружин і ресор високої розмірної точності і низької шорсткості
C75	0,70-0,80	0,15-0,30	0,40-0,70	0,035	0,035	-	-	-	-	1075	
C90	0,85-0,95	0,15-0,30	0,40-0,70	0,035	0,035	-	-	-	-	1090	
C100	0,98-1,05	0,15-0,30	0,35-0,60	0,035	0,035	-	-	-	-	1095	
3097 – підшипникові сталі											
16NiCrMo2	0,13-0,18	0,15-0,40	0,60-0,90	0,035	0,035	0,35-0,65	0,40-0,60	0,15-0,25	-	8615	Кульки, циліндри, ролики, вали, бігунки, шарніри, куліси, пластини, диски, що обертаються
20NiCrMo7	0,17-0,22	0,15-0,40	0,45-0,65	0,035	0,035	1,60-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	-	4320	
100Cr6	0,95-1,10	0,15-0,35	0,25-0,45	0,025	0,025	-	1,40-1,60	-	-	E52100	
3160 – абразивно-зносостійкі ливарні сталі											
G40CrMo4	0,37-0,42	0,20-0,35	0,75-1,00	0,035	0,035	-	0,80-1,20	0,15-0,25	-	4140	Зубчасті колеса, шестерні, шатуни, з'єднувальні штоки і тяги
G90Cr4	0,80-1,00	0,50	0,80	0,035	0,035	-	1,00-1,20	-	-	E51100	Кульки, циліндри, ролики, вали, бігунки, шарніри, куліси, що обертаються, Ø від 10 до 17 мм
7845 – термічно оброблені сталі											
30CrMo4	0,27-0,34	0,15-0,40	0,40-0,70	0,035	0,035	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-	4130	Вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, важелі, ручки, рукоятки, спиці коліс, стріли кранів, деталі турбін
35CrMo4	0,32-0,39	0,15-0,40	0,60-0,90	0,035	0,035	-	0,90-1,20	0,15-0,25	0,15-0,30 Pb	4135	Колінчастий вал, вал, вісь, шпиндель, штифт, штир, колісні бандажі
36CrMo4	0,33-0,40	0,15-0,40	0,80-1,10	0,035	0,035	-	1,00-1,30	-	-	5135	Деталі зубчастих передач, поршні, плунжери, колінчасті вали (для холодної висадки, екструзії, видавлювання і пресування)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
39NiCrMo3	0,35-0,43	0,15-0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	0,70-1,00	0,60-1,00	0,15-0,25	-	8637	Зубчасті колеса, зірочки і подібні деталі для автомобіле- будування
40NiCrMo2	0,37-0,44	0,15-0,40	0,70-1,00	0,035	0,035	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,30	-	8640, 8740	Деталі для загального машинобудування, приладів, інструментів, апаратів, апаратури, агрегатів, двигунів і транспортних засобів
40NiCrMo7	0,37-0,43	0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	1,60-1,90	0,60-0,90	0,20-0,30	-	4340	Зубчасті колеса, зірочки і подібні деталі для автомобілебудування
41Cr4	0,38-0,45	0,14-0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	-	0,90-1,20	-	-	5140	Вали, осі, шпинделі, шийки осей, деталі для контролю (для холодної висадки і екструзії)
42CrMo4	0,38-0,45	0,15-0,40	0,60-0,90	0,035	0,035	-	0,90-1,20	0,15-0,25	-	4140, 4142	Зубчасті колеса, шестерні, шатуни, з'єднувальні штоки і тяга
50CrV4	0,47-0,77	0,20-0,40	0,70-0,90	0,035	0,035	-	0,80-1,20	-	0,10 - 0,20 V	6150	Ресори, пружини, торсіони, вали, осі, шпинделі, зубчасті колеса, шестерні

Таблиця 15.15 – Хімічний склад сталей за шведською класифікацією SS14

Номер SS14	Хімічний склад, %								Найближчий номер SAE-AISI	Призначення
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo		
1147	<0,08	-	0,45	0,03	0,03	-	-	-	1006	Невеликі деталі машин, важелі, втулки, вкладиші, букси, гільзи, болти, гвинти; шурупи, пробійники, пальці, штифти, шворні, осі, цапфи, шийки, шплінти
1160	<0,08	0,03	0,35	0,03	0,04	-	-	-	1005	
1225	<0,08	0,03	0,40-0,60	0,03	0,03	0,1	0,2 Cu, 0,009N	-	1006	
1232	<0,13	-	0,30-0,70	0,05	0,05	0,25	0,30 Cu, 0,009N	-	1010	
1265	0,07-0,13	0,30	0,25-0,45	0,03	0,04	-	-	-	1010	
1870	0,94-1,06	0,10-0,35	0,30-0,60	0,030	0,030	-	-	-	1095	Пружини розтягування, деталі годинника
2101	<0,20	0,10-0,50	0,80-1,60	0,050	0,050	0,25	0,30 Cu, 0,009N	-	1016	Деталі машин, механізмів, верстатів і конструкцій низької міцності
1912	<0,14	<0,05	0,90-1,30	0,11	0,24-0,35	-	-	-	1213	Важконавантажені деталі машин, сталь, що легко піддається обробці різанням

1957	0,32-0,39	0,10-0,40	0,80-1,20	0,060	0,15-0,25	-	-	-	1139	Сталь, що легко піддається обробці різанням та термічній обробці
1973	0,46-0,54	0,10-0,40	0,80-1,20	0,06	0,015-0,25	-	-	-	1144, 1151	
2128	<0,43	0,10-0,40	1,20-1,80	0,050	0,050	-	-	-	1541	Вали, осі, шпинделі, облямовування, штифти, штирі і диски великих поперечних перерізів
2130	0,25-0,30	0,15-0,40	1,10-1,30	0,035	0,035	0,10-0,30	0,002В	-	1526	Деталі в машинобудуванні для обробки тиском та зварювання
2165	<0,24	<0,60	<1,60	<0,06	<0,05	-	-	-	1522	
2168	<0,28	<0,60	<1,60	<0,06	<0,05	-	-	-	1522	
2234	0,30-0,37	0,15-0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	0,90-1,20	-	0,15-0,30	4135	Зубчасті колеса, шестерні, шатуни, з'єднувальні штоки і тяга
2244	0,38-0,45	0,15-0,40	0,60-0,90	0,035	0,035	0,90-1,20	-	0,15-0,30	4140	
2233	0,25-0,35	0,15-0,40	0,40-0,90	0,040	0,040	0,80-1,20	-	0,15-0,30	4130	Зубчасті передачі, шарнірні деталі, вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, болти, гвинти, шурупи, втулки, вкладиші
2523	0,17-0,23	0,15-0,40	0,70-1,10	0,035	0,030-0,050	0,80-1,20	1,00-1,40	0,08-0,16	4320	Зубчасті колеса, зірочки і подібні деталі для автомобілебудування
2127	0,13-0,19	0,15-0,40	1,00-1,30	0,035	0,030-0,050	0,80-1,10	-	-	5115	Малі зубчасті колеса, вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, карданні шарніри
2245	0,38-0,45	0,15-0,40	0,60-0,90	0,035	0,035	0,90-1,2	-	-	5140	Деталі зубчастих передач, поршні, плунжери, колінчасті вали (для холодної висадки, видавлювання і пресування)
2258	0,95-1,10	0,15-0,35	0,25-0,45	0,030	0,025	1,35-1,65	-	-	Е52100	Кульки, циліндри, ролики, вали, бігунки, шарніри, куліси, пластини, диски Ø до 30 мм
250060 3	0,17-0,23	0,15-0,40	0,60-0,95	0,035	0,030-0,50	0,35-0,65	0,35-0,75	0,15-0,25	8620	Зубчасті колеса, зірочки, деталі для автомобілебудування

Таблиця 15.16 – Відповідність ДСТ та іноземних сталей

ДСТ (ГОСТ)	Німеччина (DIN)	Франція (AFNOR)	Велика Британія (BS)	Італія (UNI)	Японія (JIS)	Швеція (SS14)	США (SAE-AISI)
Сталь конструкційна вуглецева звичайної якості загального призначення							
Ст3	1.0116 St 37-3	E24-3	1501Cr161-360	Fe 360CFN Fe37-3	-	1312; 1313	A573Cr58
БСт2	1.0028 Ust34-2	A34-2	-	Fe360CFN	SS34	-	-
Сталь конструкційна вуглецева якісна							
Сталь 10	1,1121 Ck10	XC 10	045M10	C10	S10C, S9CK	1365	1010
Сталь 15кп	1.0332 StW22	1C	14494HR	FeP11	SPHD	-	A624
Сталь 15	1.1141 Ck15	XC 18	080M15	C15, C16	S15C, S15CK	1370	1015
Сталь 35	1.1183 Cf35	XC38N1TS	060A35	C36,C38	S35C	1572	1035
Сталь 45	1.1193 Cf45	XC42N1TS	060A47	C46, C43	S45C	1672	1045
Сталь 50	1.1213 Cf53	XC48N1TS	060A52	C53	S50C	1674	1050
Сталь 55	1.0535 C55	-	070M55	C55	-	1655	1055
Сталь 60	1.0601 C60	AF70C55	080A62	C60	-	-	1060
Сталь 12К	1.0345 H1	A37CP	1501Cr161-360	Fe3602KW	-	1330	A516Cr65
Сталь конструкційна низьколегована для зварних конструкцій							
14Г2	1.0481 P295GH	A48Cp, AP	1501 Cr.224	Fe510-1 KG, KT	SG 365	-	A516Gr.70
15ГФ	1.0562P355N	FeE355KGN	1501 Cr.225 – 490ALT20	FeE 335 KG, KW	SM 490 A; B; C; YA	2106	A 633Gr.C
17ГС, 17Г1С	1.0570 S355J2G3 St52-3	E36-3 E36-4	Fe510D1FF 1449 50/35	Fe510C FN	SM 490 A; B; C; YA; YB	2132, 2133, 2134, 2174	-
Сталь конструкційна легована							
15X	1.7015 15Cr	12C 3	523 M 15	-	SCr415(H)	-	5015, 5115
30X	1.7030 28 Cr4	-	530 A 30	-	-	-	5130
35X	1.7033 34 Cr4	32C4	530 A 32	34 Cr4 (KB)	S Cr430(H)	-	5132
30Г	1.1170 28Mn6	20M5	150 M 28	C28Mn	SCMn1	-	1330
40Г	1.1157 40Mn4	35M5, 40M5	150 M 36	-	-	-	1035, 1041
35Г2	1.1167 36Mn5	35M5	150 M 36	-	SMn438(H)	2120	1335
40ХН	1.5711 40NiCr6	-	-	-	-	-	3140

40XH2MA	1.6511 3636CrNiMo4	36CrNiMo4	817 M 37	38NiCrMo2	-	-	4340
38XГНМ	1.6546 40NiCrMo2-2	40NCD2	3111-Type7	40NiCrMo2	SNCM240	-	8740
40X2H2MA	1.6565 40NiCrMo6	-	817 A 37	-	SNCM439	-	4340, 9850
38X2H2MA	1.6582 34CrNiMo6	34CrNiMo8	816 M 40	35NiCrMo6KB	SNCM447	2541	4337, 4340
Сталь конструкційна теплостійка							
12XM	1.7335 13CrMo4-5	15CD3.5	620-440	14CrMo3	SFVA F12	2216	A182-F11
15XM	1.7337 16CrMo4-4	15CD4.5	-	18CrMo4 5KW	-	2216	A387Cr12C12
Сталь конструкційна підшипникова							
ШХ15	1.3505 100Cr6	100 C 6	2 S 135	100 Cr 6	SUJ 2	2258	52100
ШХ10	1.7034 37Cr4	37 Cr 4	31111-3/1	36 CrMn4	SCr 435 H	-	5135
Сталь конструкційна ресорно-пружинна							
60Г	1.1221 Ck 60	XC 60	080A62	C 60	S58C	1678	1060
55C2	1.5026 55Si7	55 S 7	251 A 58	55 Si 7	-	2085, 2090	9255
60C2	1.5027	60Si7	60 S 7	251 A 60	60 Si 7	-	9260
Сталь інструментальна вуглецева							
У8	1.1625 C80W2	-	BW 1B	-	SKC 3	-	W 1
У10	1.1645 C 105 W 2	C105E2U	-	-	SK 3	-	W 110
У13	1.1663 C 125 W	C120E3U	-	C 120KU	SK 2	-	W 112
Сталь інструментальна легована							
ХВГ	1.2419 105 WCr 6	105 WCr 5	-	107 WCr 5 KU	SKS2	2140	-
Сталь інструментальна штампова							
X12	1.2080 X210Cr12	X200Cr12	BD 3	X 205 Cr 12 KU	SKD 1	-	D 3
4X5MΦC	1.2343 X38CrMoV5-1	X38CrMoV5	BH 11	X37CrMoV 5 1 KU	SKD 6	-	H 11
4X5MΦ1C	1.2344	X40CrMoV5	BH 13	X40CrMoV 5	SKD 61	2242	H 13

	X40CrMoV5-1			1 KU			
3X3M3Φ	1.2365 X32CrMoV3-3	32CrMoV12-28	BH 10	30CrMoV 12 27 KU	-	-	H 10
5XB2CΦ	1.2542 45WCrV7	45WCrV8	BS 1	45WCrV 8 KU	-	2710	S1
3X2B8Φ	1.2581 X30WCrV9-3	X30WCrV9	BH 21	X30WCrV93KU	SKD 5	-	H 21
5XHM	1.2713 55NiCrMoV6	55NiCrMoV7	BH 224/5	-	SKT 4	-	L6
Сталь інструментальна швидкорізальна							
P6M5K5	1.3243 S6-52-5	Z 85WDKCV 06-05-05-04-02	BM 35	HS 6-5-2-5	SKH 55	2723	-
P18	1.3355 S 18-0-1	HS 18-0-1	BT 1	HS 18-0-1	SKH 2	2750	T1
Сталі та сплави корозійно- та жаростійкі, жароміцні, зносостійкі							
08X13	1.1400 X7Cr13	Z6C13; Z3C14	103S17	X6Cr13	SUS403; SUS410S	2301	403; 410 S
08X18H11	1.4303 X5CrNi19 11	Z8CN18 12	305S19	X8CrNi1910	SUS305	-	308; 305
08X16H13M2B	1.4580 X10CrNiMoN18 10	Z6CNDNb17.12; Z6CNDNb17.12	-	X6CrNiMoNb1712	-	-	316Ch
Сталь лита							
20ГСЛ	1.1133 20Mn5	20 M 5	120 M 19	G 22 Mn 3 20 Mn 7	SMnC 420	2132	1022, 1518
30ГСЛ	1.1165 30 Mn 5	35 M 5	150 M 28	-	SCMn 2	-	1330
27ХГСНМДТЛ	1.1165 30 Mn 5	35 M 5	120 M 36	-	SMn433 H	-	1036
07X18Т9Л	1.4308 G-X6CrNi18 9	Z6CN18.10M	304C15	-	SCS13	-	-
110Г13Л	1.3401 X120Mn12	Z 120 M 12	-	GX 120 Mn 12	SCMnH 1	2183	A128 (A)

Наприклад, JIS G3445 STKM11A – низьковуглецева трубна сталь з наступним хімічним складом: C = 0,12 %; Si = 0,35 %; Mn = 0,60 %; P = 0,040 %; S = 0,040 %.

Класифікація сталей та сплавів у Великій Британії (BS) розроблена британським інститутом стандартів (табл. 15.12). Кожне позначення цієї класифікації включає вид виробу та код сплаву. Наприклад, BS 979 708A37 – низьколегована сталь з таким хімічним складом: C=0,35-0,40%; Si=0,10-0,35%; Mn=0,70-1,00%; P<0,040%; S<0,050%; Cr=0,90-1,20%; Mn=0,15-0,25%.

Класифікація сталей та сплавів, прийнята у Франції (AFNOR) розроблена Association Francaise de Normalisation. У марці сталі прописні букви NF розміщені ліворуч від буквенно-цифрового коду. Код складається з заголовної букви з наступним рядом цифр і букв (табл. 15.13). Наприклад, NF A35-562 35MF6 – легвана сіркою сталь (легко обробляється різанням) з таким складом: C=0,33-0,39%; Si=0,10- 0,40%; Mn = 1,10 - 1,70%; P < 0,040%; S < 0,09 - 0,13%.

Італійська класифікація (UNI) розроблена Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Італійським стандартом передбачено такий порядок маркування сталей та сплавів: на початку марки – заголовні букви UNI, за якими слідує цифровою код продукції та алфавітно-цифрова ідентифікація сплаву (табл. 15.14). Наприклад, UNI 5598 3CD5 – низьковуглецева сталь для катанки з наступним складом: C < 0,06%; Mn = 0,25 - 0,50%; P < 0,035%; S < 0,035%; N < 0,007%.

Шведська класифікація (SS14) розроблена шведським інститутом стандартів. Позначення починаються з букв SS, за якими слідує чотиризначне число (табл. 15.15).

Аналоги вітчизняних та іноземних сталей та сплавів Відповідність ознак ДСТ та іноземних сталей показано в табл. 15.16.

Список використаних джерел

1. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Київ: Либідь, 2002.-с.326.
2. Сологуб М.А., Рожнецький І.О., Некоз О.І та ін. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. К.: Техніка, 2002. – с. 374.
3. Попович В., Голубець В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Книга II. Суми. Університетська книга, 2002.-с.259.
4. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Книга I. Львів. 2000.-с.264.
5. Роговський Л.Л., Зазимко О.В., Роговський І.Л. Лабораторні роботи з дисципліни „Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство”. Київ: Національний аграрний університет, 2003.-с. 18.
6. М.І. Майський, В.М. Майський. Лабораторно-практичні роботи з технології металів і конструкційних матеріалів. Київ: 1972.-с. 152.
7. Визначення прогартуваності сталей методом торцевого гартування/ О.О. Котречко, А.С.Опальчук, К.Г.Лопатько та ін.// Київ: Національний аграрний університет, 2002. - с. 11.
8. Поверхневе зміцнення сталей /А. С. Опальчук, К. Г. Лопатько, О. В. Зазимко та ін. // Методичні вказівки до лабораторних робіт з розділу „Термічна обробка сталі”. Київ: Національний аграрний університет, 1998.-с. 18.
9. Технологія металів та інших конструкційних матеріалів. За редакцією Г.О.Прейса. К.: Вища школа, 1973. – с. 512.
10. Г. П. Хомченко. Хімія для вступників до вузів. Київ: Вища школа, 1991.-с. 423.
11. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. Металознавство : підручник / О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко. – Київ : Політехніка, 2006. – 384 с.
12. Кузін О. А., Яцюк Р. А. Металознавство та термічна обробка металів : підручник / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. – Львів : Афіша, 2002. – 304 с.
13. Климов О. В., Лисиця О. В., Кононенко Ю. І. Металознавство для зварників : навчальний посібник / О. В. Климов, О. В. Лисиця, Ю. І. Кононенко – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 227 с.