

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Кафедра якості, стандартизації, сертифікації
та технології виготовлення матеріалів**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійного вивчення дисципліни

“МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО”

Харків – 2015

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технології виготовлення матеріалів 10 листопада 2014 р., протокол № 8.

Рекомендуються для магістрів спеціальності «Якість, стандартизація та сертифікація» механічного факультету.

Укладачі:

проф. Л.А. Тимофєєва,
доц. І.І.Федченко

Рецензент

проф. Е.С. Геворкян

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійного вивчення дисципліни

“МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО”

Відповідальний за випуск Федченко І.І.

Редактор Буранова Н.В.

Підписано до друку 10.12.14 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,00. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра „Матеріали та технології виготовлення виробів
транспортного призначення”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійного вивчення дисципліни «Матеріалознавство»

Харків 2014

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технології виготовлення матеріалів 10 листопада 2014 р., протокол № 8.

Рекомендуються для магістрів спеціальності «Якість, стандартизація та сертифікація» механічного факультету.

Укладачі:

проф. Л.А. Тимофєєва,
доц. І.І. Федченко

Рецензент

проф. Е.С. Геворкян

ЗМІСТ

Вступ.....	4
ТЕМА 1. Основні властивості металевих і неметалевих матеріалів.....	5
ТЕМА 2. Конструкційні метали і сплави.....	19
ТЕМА 3. Основи термічної і хіміко-термічної обробки металів..	27
ТЕМА 4. Інструментальні матеріали.....	37
Список літератури.....	45

ВСТУП

Матеріалознавство – це наука, яка вивчає склад, структуру та властивості конструкційних матеріалів, а також зміну цих властивостей під впливом тепла і в результаті механічних і хімічних дій. Воно об'єднує металознавство та науку про неметалеві матеріали.

Теоретичною основою матеріалознавства є відповідні розділи фізики та хімії. У матеріалознавстві широко використовують сучасні структурні дослідження, фізичні та механічні випробування. Завдяки цьому, а також беручи до уваги економічні розрахунки, можна обґрунтовано визначити доцільність застосування того чи іншого матеріалу в певних умовах експлуатації.

Металами називають речовини, які мають кристалічну будову, металевий блиск, добру пластичність, високу електро- і теплопровідність. Найбільш поширеними в природі металами є алюміній (8,8 % маси земної кори) та залізо (4,6 %).

У промисловості в основному використовують сплави, адже до рідкого металу можна вводити певну кількість хімічних елементів і отримувати сплави з необхідними властивостями.

Умовно метали поділяють на чорні і кольорові.

До *чорних* металів належать залізо та сплави на його основі – сталь і чавун. Сталі і чавуни є основними в машинобудуванні завдяки порівняно невисокій вартості та добрим технологічним і механічним властивостям. Але вони мають невисоку корозійну стійкість та високу їх питому вагу.

Кольоровими вважаються всі інші метали, крім чорних. Найбільше застосування мають алюміній, мідь, магній, титан, цинк, свинець, олово, нікель, молібден, вольфрам, кобальт, тантал, цирконій, ніобій. Здебільшого кольорові метали застосовуються у вигляді сплавів.

Метали і сплави людство застосовує дуже давно. Мідь, золото і срібло застосовуються уже більше 8 тис. років як знаряддя праці та прикраси.

Вчені доводять, що залізо використовується понад 3 тис. років. На території України залізо відоме з VII-V ст. до н. е.

У газовому господарстві поряд з металами широко застосовуються неметалеві будівельні та полімерні матеріали.

Полімерні матеріали є новим видом конструкційних матеріалів. Вони мають достатню міцність, високу корозійну стійкість, низьку теплопровідність та ряд інших цінних фізико-механічних властивостей, які обумовлюють їх широке застосування.

ТЕМА 1. Основні властивості металевих і неметалевих матеріалів

Лекція 1 (2 год)

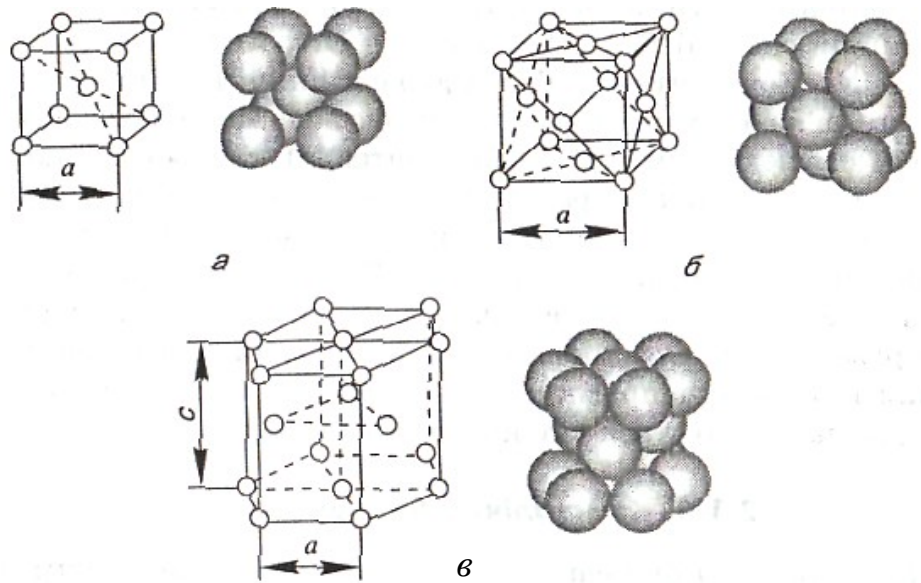
1 Будова металів, методи дослідження їх структури

1.1 Кристалічна будова металів

Кристалічна будова характеризується геометрично правильним розташуванням атомів (іонів) у просторі. Атоми металу перебувають на певній відстані між собою, при якій енергія взаємодії позитивно і негативно заряджених частинок мінімальна. В площині атоми утворюють атомну сітку, а в просторі – атомно-кристалічну ґратку. Атоми коливаються навколо точки рівноваги з великою частотою. Властивості металів визначаються певним типом кристалічної ґратки. Переважна більшість металів має кубічну об'ємцентричну, кубічну гранецентричну або гексагональну щільноукладену ґратку (рисунок 1.1).

У кристалічній ґратці *об'ємцентричного куба* (ОЦК) вісім атомів розташовано на перетині ребер куба і один — на перетині його діагоналей. Таку будову (ОЦК) мають метали: калій, натрій, β-титан, β-цирконій, тантал, вольфрам, ванадій, α-залізо, хром та інші.

Кристалічна ґратка характеризується її лінійним розміром. Для кубічної комірки це довжина ребра куба *a*, яка вимірюється в нанометрах (нм). Один нанометр $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$. Для металів з кубічною елементарною ґраткою значення *a* перебуває в межах 0,2...0,6 нм.



а – об’ємцентричний куб; б – гранецентричний куб;
в – гексагональна ґратка

Рисунок 1.1 – Елементарні кристалічні ґратки

Елементарна кристалічна ґратка **гранецентричний куб** (ГЦК) має вісім атомів на перетині ребер і шість атомів — на перетині діагоналей граней куба. Така будова властива для свинцю, нікелю, срібла, золота, платини, γ -заліза та інших металів.

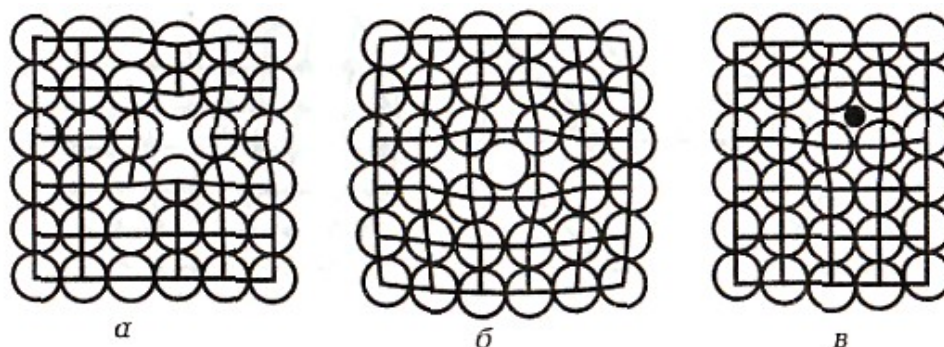
У **гексагональній щільноукладеній ґратці** (ГЩУ) атоми розташовані в кутах і в центрі основ шестигранної призми, а три атоми — між її основами, всього 17. Таку ґратку мають магній, α -титан, кадмій, реній, осмій, рутеній, цинк, берилій та інші метали.

1.2 Дефекти кристалічної будови

Реальні кристали, на відміну від ідеальних, мають багато різних дефектів. Під **дефектом** розуміють зону кристала, де порушено правильне розташування атомів. За геометричною ознакою дефекти кристалічної будови поділяють: на точкові, лінійні, поверхневі, об’ємні (рисунок 1.2).

Точкові дефекти дуже малі в усіх трьох вимірах у просторі: їх розміри не перевищують декількох параметрів кристалічної

гратки. До таких дефектів належать вакансії, міжвузлові атоми, атоми домішок тощо.



а – вакансія; б – міжвузловий атом; в – атом домішки
Рисунок 1.2 – Точкові дефекти

Вакансією називається порожнє місце в кристалі, де мав би міститися атом. Окремий атом, що коливається з вищою енергією, залишає вузол кристалічної ґратки і потрапляє на поверхню кристала або на границю між зернами. На місці, де перебував цей атом, утворилась вакансія, яку заповнює згодом інший атом. В результаті відбувається міграція вакансії в глибину кристала.

Кожній температурі відповідає своя рівноважна концентрація вакансій. Що вища температура кристалу, то більше в ньому вакансій і частіше вони переходять від вузла до вузла. При температурі, близькій до температури плавлення металу, кількість вакансій становить близько 1 % кількості атомів у кристалі. Зі збільшенням кількості вакансій зменшуються густина, електро- і теплопровідність кристалу.

Міжвузловим називають **атом**, що вийшов із положення рівноваги і зайняв простір між вузлами. На його місці утворилась вакансія. Перехід атомів у між-вузлове положення викликає опромінення нейтронами, при цьому значно менший вплив мають теплові коливання атомів.

Атоми домішок є навіть у найчистішому металі. Вони або заміщають атоми основного металу у вузлах кристалічної ґратки, або розташовуються між вузлами. У близькому оточенні точкових дефектів кристалічна ґратка викривлюється. Такі

спотворення суттєво не позначаються на механічних властивостях металу, зате вони позначаються на деяких його фізичних властивостях, наприклад на електроопорі.

У різних площинах кристалічної ґратки атоми розміщені з різною щільністю і тому властивості кристала в різних напрямках різні. Таке явище називається *анізотропією*.

Найбільш суттєвим лінійним порушенням будови кристала є *дислокації*. Одним із способів утворення дислокації є зсув частини атомів кристала відносно іншої частини атомів. У невеликій спотвореній зоні міжатомні відстані менші або більші від нормальних, а поза межами цієї зони вони нормальні. Дислокації виникають під час кристалізації, пластичної деформації, фазових перетворень.

1.3 Кристалізація металів

Кристалізація – це перехід металу з рідкого стану у твердий. У рідкому стані атоми металу перебувають у безперервному русі і при охолодженні займають певний порядок. Кристалізація починається при зниженні температури розплаву до певного значення.

Кристалізація відбувається у дві стадії:

- утворення зародків кристалізації;
- ріст кристалів навколо цих зародків.

Ріст кристалів відбувається за рахунок приєднання до зародків нових атомів. На початку кристалізації кристали ростуть вільно, зберігаючи правильну геометричну форму. Розмір кристалів збільшується, як збільшується і кількість зародків. Вільний ріст кристалів триває до моменту стикування із сусідніми кристалами. У місцях стикування ріст кристалів припиняється і продовжується там, де є вільний доступ рідкого металу. В результаті геометрична форма кристалів спотворюється. Такі кристали називаються кристалітами або зернами.

Дефекти геометричної форми кристалів та збільшення розмірів зерен негативно впливають на властивості металу. Кращі властивості мають метали, під час кристалізації яких виникає

якомога більша кількість зародків кристалізації. Тоді метал буде мати дрібнозернисту структуру.

Кількість зерен буде збільшуватись, і вони будуть дрібнішими, якщо до рідкого металу перед початком кристалізації ввести дрібні тугоплавкі частинки нітридів, карбидів і силіцидів металів. Таке введення штучних центрів кристалізації називається модифікацією сплаву чи металу.

1.4 Поліморфні перетворення

Поліморфним перетворенням називають зміну 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 прихованої теплоти перекристалізації. Близько 30 металів мають два, а іноді й три різні типи елементарних кристалічних ґраток. Кристалічну будову, стійку при низьких температурах, позначають грецькою літерою α , при високих температурах — літерою β , при ще вищих — літерою γ і т. д. Перелічені грецькі літери у вигляді індексів долучають до символу хімічного елемента (наприклад, Fe_α , Fe_γ , Ti_α , Ti_β , Sn_α , Sn_β). У рівноважному стані залізо має дві температури поліморфного перетворення: 911 і 1392 °С. Воно кристалізується при температурі 1539 °С з утворенням кристалічної ґратки об'ємцентричного куба Fe_α . При температурі 1392 °С внаслідок вторинної кристалізації об'ємцентрична ґратка Fe_α переходить у гранецентричну Fe_γ , а при 911 °С — знову в об'ємцентричну ґратку Fe_α (рисунок 1.3). Критична температура 768 °С не пов'язана із вторинною кристалізацією, а лише зі змінами в міжелектронній взаємодії, внаслідок чого залізо під час охолодження набуває магнітних властивостей. При температурах, вищих за 768 °С, залізо немагнітне.

Зміна типу кристалічної будови у твердому стані відбувається шляхом зародження центрів нових кристалів і подальшого їх росту.

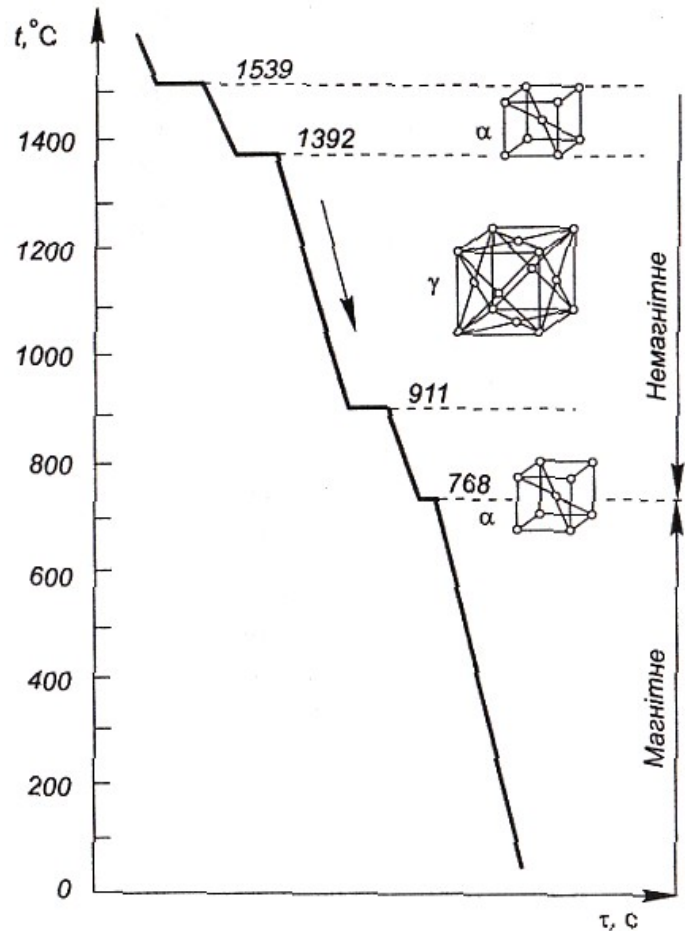


Рисунок 1.3 – охолодження заліза Крива

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.

1.5 Методи дослідження структури металів

Методи дослідження структури — макро- і мікроскопічний аналіз, рентгеноструктурний аналіз та інші — широко використовують не лише в наукових, але й у заводських лабораторіях, оскільки здебільшого існує надійний зв'язок між структурою та властивостями металів. На підставі структурних досліджень і механічних випробовувань можна зробити висновок

про придатність обстежуваного матеріалу для тих чи інших умов експлуатації.

Макроскопічний аналіз полягає у дослідженні будови металу неозброєним оком або при невеликих збільшеннях до 30 разів. Будову металу, яку виявляють при цьому, називають **макроструктурою**. Макроструктуру можна спостерігати на поверхні виробів, на зламах і на шліфах.

Макроскопічний аналіз застосовують для виявлення макродефектів: порожнин і тріщин, хімічної та структурної неоднорідності металу, форми та розмірів кристалів у литому металі тощо.

Перевагою макроаналізу є можливість швидко обстежити досліджувану поверхню з метою отримати попередні дані про будову металу. Водночас, внаслідок невеликих збільшень, макроаналіз не дає змоги виявити всі особливості будови металу. На підставі даних макроаналізу часто роблять висновок про недоцільність застосування технологій, які мають вплив на формування макроструктур, що погіршують механічні властивості металу.

Мікроскопічним аналізом називають дослідження будови металу за допомогою мікроскопа; будова металу, яку вивчають під мікроскопом, є **мікроструктурою**. Для мікроскопічних досліджень широко використовують оптичні та електронні мікроскопи.

Під час мікроаналізу вивчають тонку будову матеріалу: форму та розміри зерен і фаз у сплаві, їх відносний розподіл, а також виявляють неметалеві вкраплення (оксиди, сульфідні) чи мікродефекти (дислокації, мікропорожнини, мікротріщини). Зокрема, за мікроструктурою знаходять у сплаві частку певного хімічного елемента, наприклад вуглецю у сталі.

Об'єктом мікроскопічних досліджень є **мікрошліф**, тобто зразок із шліфованою, полірованою і здебільшого протравленою хімічним реактивом поверхнею.

За допомогою **оптичного металографічного мікроскопа** досліджують структуру при збільшенні від 50 до 2000 разів, тобто за його допомогою можна розрізнити елементи структури розміром до 0,2 мкм (200 нм).

Дуже дрібні частинки структури вивчають завдяки *електронному мікроскопу*, де зображення створюється за допомогою швидкого потоку електронів. При цьому спостерігаються частинки структури розміром до 2...5 нм. Електронний мікроскоп на противагу оптичному забезпечує значну глибину різкості зображення при збільшеннях до 100 000 разів.

Розташування атомів у кристалах і відстані між ними визначають шляхом *рентгеноструктурного аналізу* з використанням *рентгенівських променів*. Якщо в напрямку потоку цих променів поставити фотопластинку, то посилені промені залишать на ній кільцеві плями, розшифровуючи які, можна встановити тип кристалічної ґратки і величину її параметрів. Рентгенівськими променями визначають також дефектність, деформацію кристалічної ґратки та орієнтацію зерен.

Лекція 2 (2 год)

2 Основні властивості конструкційних матеріалів

2.1 Фізичні та хімічні властивості матеріалів

Конструкційні матеріали характеризуються різними властивостями, які визначають якість матеріалів та галузь їх застосування. За рядом ознак основні властивості матеріалів поділяють на фізичні, механічні, технологічні та хімічні.

Фізичні властивості матеріалу характеризують його будову або відношення до фізичних процесів навколишнього середовища. Всі конструкційні матеріали відрізняються густиною, теплопровідністю і теплоємністю.

Для металів важливими фізичними характеристиками є температура плавлення та електропровідність. Будівельні матеріали також характеризуються щільністю, гігроскопічністю, морозостійкістю, вогнестійкістю.

Густина матеріалу визначається відношенням маси до об'єму матеріалу в абсолютно щільному матеріалі ρ (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Густина та щільність деяких конструкційних матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м ³	Щільність, кг/м ³
Конструкційна сталь	7850 – 7900	7800 – 7850
Граніт	2700 – 2800	2600 – 2700
Пісок	2500 – 2600	1450 – 1700
Керамічна цегла	2600 – 2700	1600 – 1900
Сосна	1500 – 1550	450 – 600
Поропласт	1000 – 1200	20 – 100

Більшість будівельних матеріалів мають порожнисту будову, тому вони характеризуються щільністю або середньою густиною ρ_m . У щільних матеріалів (сталь, скло, бітум та ін.) густина і щільність практично однакові.

Щільність матеріалу залежить від його порожнистості та вологості. Штучні матеріали, наприклад бетон, можна отримувати з різним ступенем порожнистості.

Сипкі матеріали (пісок, цемент, щебінь тощо) характеризуються насипною щільністю.

Основними хімічними властивостями конструкційних матеріалів є хімічна та корозійна стійкість.

Хімічна стійкість – здатність матеріалів протидіяти руйнівній дії лугів, кислот, розчинених у воді солей і газів.

Корозійна стійкість – здатність матеріалів протидіяти корозійному впливу навколишнього середовища. Багато конструкційних матеріалів не мають достатньої корозійної стійкості. Так, більшість цементів руйнуються під дією кислот, бітуми не стійкі проти дії розчинів лугів, деревина та вуглецева сталь мають невисоку корозійну стійкість. Найкращу корозійну стійкість мають благородні метали, титан, алюміній та більшість їх сплавів, спеціальні сталі, щільна кераміка та більшість пластмас.

2.2 Механічні властивості матеріалів

До механічних властивостей належать міцність, пружність, пластичність, твердість, ударна в'язкість, витривалість, зносостійкість та ін. Від механічних властивостей матеріалу

залежить його поведінка при деформації і руйнуванні під дією зовнішніх сил. Для їх визначення зразки металів встановленого розміру і форми піддають випробуванням на спеціальних машинах та приладах у певних умовах. Умови випробувань поділяють на статичні (навантаження на зразок зростають повільно і плавно), динамічні (навантаження зростає з великою швидкістю і має ударний характер) та циклічні (навантаження багаторазово змінюються за величиною і напрямком).

Статичні навантаження при випробуваннях можуть бути розтяжними та стискальними. Метали найчастіше випробовують на розтягування, визначаючи межі пружності, плинності і міцності та його пластичність.

2.3 Міцність і пластичність металу

Характеристики міцності та пластичності отримують при розтягуванні зразка у вигляді круглого стержня або штаби. На спеціальних машинах записують залежність видовження зразка від навантаження. На основі цих даних будують діаграму залежності відносного видовження зразка δ від напруження σ . Вид діаграми суттєво залежить від *пластичності* матеріалу, що характеризує здатність, не руйнуючись, змінювати форму під дією навантаження і зберігати її після того, як навантаження перестане діяти.

Відрізок OA діаграми відповідає пружній деформації металу, коли виконується закон Гука $\sigma = E \cdot \delta$, де E — модуль пружності (модуль Юнга) (рисунок 2.1).

Напруження, що відповідає граничній пружній деформації в точці A, називають *межею пропорційності* σ_a (або *межею пружності*). В системі СІ її виражають у *мегапаскалях*. При вищих напруженнях відбувається рівномірна пластична деформація (видовження та звуження поперечного перерізу) зразка.

Оскільки практично неможливо визначити початок переходу металу в непружний стан, межу пружності встановлюють умовно, задаючись залишковою деформацією, найчастіше 0,001; 0,005; 0,02 і 0,05%. Межу пружності відповідно позначають $\sigma_{0,01}$; $\sigma_{0,05}$ і т. д. Ця характеристика важлива для пружинних та інших матеріалів.

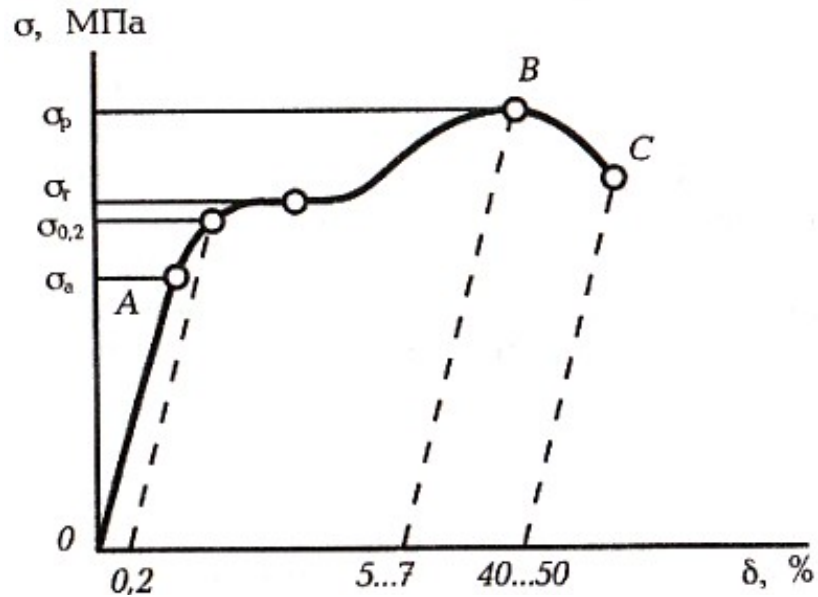


Рисунок 2.1 – Діаграма розтягування сталі

Чимало пластичних матеріалів при напруженнях, трохи вищих за σ_a , на діаграмі розтягування мають ділянку, при якій зразок деформується без збільшення навантаження. Напруження, що відповідає цьому стану матеріалу, називають **межею плинності** і позначають σ_T . Напруження, що діють у деталі, мають бути меншими за межу плинності.

Подальше розтягування зразка супроводжується рівномірним зростанням напруження до σ_v — **межі міцності** (здатності протидіяти руйнуванню під дією зовнішніх сил). Це напруження є найбільшим і відповідає початку великої пластичної деформації невеликої ділянки зразка, що називається шийкою. Саме тут переріз зразка значно зменшується і відбувається руйнування.

Напівкрихкі матеріали руйнуються при напруженнях, що дорівнюють σ_v , у крихких — ділянки плинності немає.

За діаграмою розтягування визначають такі характеристики пластичності, як відносне видовження δ та відносне звуження Ψ . Відносне видовження характеризує приріст довжини зразка щодо початкової, а відносне звуження — щодо зменшення площі перерізу:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad (2.1)$$

де l_1 і l_0 — довжина зразка до і після деформації;

$$\psi = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де S_1 і S_0 — відповідно площі перерізу зразка до і після випробувань. За показниками пластичності визначають придатність матеріалу до пластичної деформації під час обробки тиском, а також здатність його перерозподіляти напруження при перевантаженнях. Ці дані важливі як для конструкторів, так і для технологів. Наприклад, пластичні матеріали більш надійні в роботі, бо при їх застосуванні існує менша ймовірність небезпечного крихкого руйнування.

2.4 Міцність неметалевих матеріалів

Матеріали мінерального походження (камінь, цегла, бетон тощо) добре працюють на стискування, тому їх застосовують у відповідних конструкціях. Міцність таких матеріалів визначається стискуванням зразків певних розмірів на пресах. **Межа міцності на стискування** визначається як відношення прикладеної до зразка сили до площі поперечного перерізу зразка. За межею міцності для кам'яних матеріалів встановлюється марка (4, 7, 10, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000). Так, матеріали з межею міцності на стискування 20 – 29,9 МПа належать до марки 200. Деревинні матеріали також випробовують на розтягування та стискування, визначаючи відповідну межу міцності в *мегапаскалях*.

Міцність залежить також від структури матеріалу, його щільності, вологості, напряму дії прикладеної сили (таблиця 2.2).

Конструкційні матеріали випробовують також на міцність при згинанні зразків певних розмірів. На згин випробовують зразки у вигляді балок, розміщених на двох опорах. До середини балок прикладають певну силу, яка поступово зростає до руйнування зразків. За прикладеною силою і розмірами балки визначають **межу міцності на згин**. Ця межа міцності в значній мірі залежить від профілю виробу.

Таблиця.2.2 – Міцність деяких конструкційних матеріалів

Матеріали	Межа міцності, МПа, при		
	стискуванні	згинанні	розтягуванні
Граніт	150 – 250	–	3 – 5
Важкий бетон	10 – 50	2 – 8	1 – 4
Керамічна цегла	7,5 – 30	1,8 – 4,4	–
Конструкційна сталь	210 – 600	–	380 – 900
Деревина (за волокнами)	30 – 65	70 – 120	55 – 150
Склопластик	90 – 150	130 – 250	60 – 120

2.5 Твердість

Статичне стискування металу спеціальним індентором застосовують при визначенні *твердості* — здатності металу протидіяти пружним і пластичним деформаціям під час проникнення іншого твердішого тіла. Найчастіше практикуються випробування твердості металів за методами Брінелля, Роквелла та Віккерса.

Визначення твердості за методом Брінелля зводиться до втискання у випробовуваний матеріал сталевий загартований кульки певного діаметра, на яку діє сила F протягом часу, достатнього для закінчення в металі пластичних деформацій. Вимірюється діаметр відбитка, і за таблицями визначається величина твердості (HB) (рисунок 2.2).

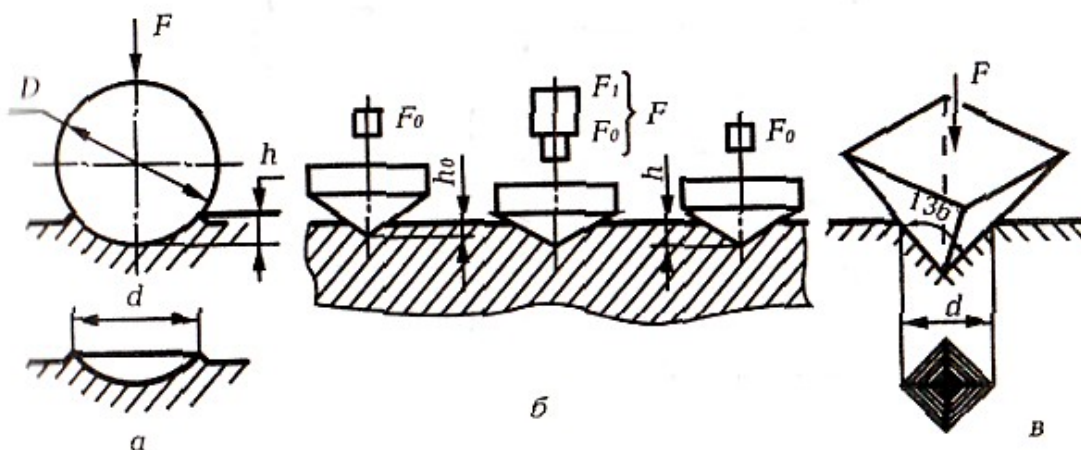


Рисунок 2.2 – Схеми визначення твердості металів за методами:
а – Брінелля; б – Роквелла; в – Віккерса

За методом Роквелла твердість визначають за глибиною проникнення алмазного конуса чи кульки діаметром 1,6 мм, вираженою в умовних одиницях (**HRC**, **HRA** чи **HRB**). За методом Роквелла визначають твердість твердих, дуже твердих і м'яких матеріалів. Відповідно використовують алмазний конус з кутом 120° та сумарне навантаження 1,47 кН (шкала С), алмазний конус і сумарне навантаження 0,59 кН (шкала А) та сталеву кульку з навантаженням 0,98 кН (шкала В). Спочатку до індектора прикладають попередню силу F_0 , під дією якої він заглиблюється в метал на величину h_0 . Потім плавно додають основну силу F_1 . За одиницю твердості прийнята величина, що відповідає осьовому переміщенню індентора на 0,002 мм.

Метод Віккерса використовують при визначенні твердості деталей малої товщини і тонких дуже твердих поверхневих шарів металевих деталей. Навантаження при випробуваннях становить 0,05...1,20 кН. Метод мікротвердості використовують при визначенні твердості окремих зерен або дуже тонких шарів металу.

Твердість деревини, бетону також визначають методом втискування в зразок сталеві кульки. Величину твердості визначають за діаметром чи глибиною відбитка.

Твердість природних кам'яних матеріалів визначають за шкалою твердості (метод Мооса), в якій десять спеціально підібраних матеріалів розміщені в такій послідовності, коли наступний по порядку мінерал залишає слід (подряпину) на попередньому.

2.6 Ударна в'язкість, витривалість та зносостійкість

Основним видом випробувань металів при динамічних навантаженнях є випробування на ударний згин надрізаних зразків стандартизованого розміру. **Ударною в'язкістю** називають відношення роботи, яка витрачена на руйнування зразка, до початкової площі його поперечного перерізу в місці руйнування. Зразок з надрізом встановлюють на маятниковому копрі і ударяють по ньому маятником.

Більшість деталей машин і конструкцій, що працюють при циклічних навантаженнях, руйнуються після певної кількості

циклів при напруженнях, нижчих за σ_T . Це явище називають втомою. За характеристику міцності металу в таких умовах використовують *межу витривалості* σ_{-1} — найбільше напруження, при якому деталь не руйнується після певної кількості циклів навантаження, що називають *базою*. Для сталі вона становить 10^7 циклів, а для кольорових металів — 10^8 . Дослідження проводять на випробувальних машинах, частіше з обертовим зразком.

На *зносостійкість* конструкційні матеріали випробовують на спеціальних барабанах, що обертаються.

Оскільки при стандартних випробуваннях важко повністю відтворити умови роботи деталі в конструкції чи машині, часто готові деталі додатково випробовують на стендах або в процесі експлуатації. Це, хоча і вимагає більших витрат, проте дає змогу приймати більш обґрунтовані рішення при виборі матеріалу і способі його зміцнення.

ТЕМА 2. Конструкційні метали і сплави

Лекція 3 (4 год)

3 Основні положення теорії сплавів. Сплави заліза з вуглецем

3.1 Основні поняття про сплави

Чисті метали в більшості випадків не забезпечують необхідного комплексу механічних і технологічних властивостей і тому рідко використовуються для виготовлення деталей. У більшості випадків у техніці використовують сплави.

Сплавом називають речовину, яка складається з двох або більше компонентів.

Більшість сплавів отримують у рідкому стані, однак вони можуть бути одержані також шляхом спікання, електролізу, конденсації з пароподібного стану тощо. Компонентами у складі металевих сплавів можуть бути і неметали (металоїди), але переважати мають метали. Не всяка сполука компонентів дає

сплав. Залізо та свинець, наприклад, у рідкому стані розділяються на два шари, і одержання сплаву цих компонентів стає неможливим. Необхідною умовою для виготовлення сплавів є взаємна дифузія атомів компонентів. Ця умова найлегше задовольняється тоді, коли компоненти перебувають у рідкому стані і утворюють однорідні розчини на атомному рівні. Під час кристалізації, залежно від фізико-хімічних властивостей компонентів, їх атоми взаємодіють. Внаслідок такої взаємодії формуються структури у вигляді:

- твердого розчину заміщення або проникнення;
- хімічної сполуки;
- механічної суміші з різнорідних кристалів тощо.

У **твердому розчині заміщення** атоми розчиненого компонента заміщують частину атомів компонента-розчинника в його кристалічній ґратці. Кількість заміщених атомів може змінюватись у широкому діапазоні. Залежно від цього розрізняють тверді розчини з необмеженою і з обмеженою розчинністю. Для утворення таких розчинів необхідно вибрати компоненти, в яких:

- однаковий тип елементарної кристалічної ґратки;
- різниця розмірів атомних радіусів не перевищує 8...15 %;
- близька будова валентних атомних рівнів компонентів.

У **твердому розчині проникнення** атоми розчиненого компонента можуть перебувати в міжатомних порожнинах просторової кристалічної ґратки компонента розчинника.

Зважаючи на невеликі розміри порожнин кристалічної ґратки металу-розчинника, можна стверджувати, що в них можуть перебувати лише атоми неметалів з малими розмірами (вуглець, водень, бор). Тверді розчини проникнення бувають тільки **обмеженими**, концентрація розчиненого компонента в них практично не перевищує 2 %.

Хімічна сполука найчастіше утворюється з елементів, які істотно відрізняються за будовою і властивостями. Співвідношення кількості атомів елементів, що входять до складу сполуки, строго визначене й виражається певною формулою. Елементарна кристалічна ґратка хімічної сполуки є відмінною від кристалічних ґраток компонентів, що її утворили. Хімічні елементи в ній займають строго визначені положення.

Властивості хімічної сполуки істотно відрізняються від властивостей компонентів. Переважно хімічним сполукам властива низька пластичність і висока твердість, яка істотно перевищує твердість компонентів. На відміну від твердих розчинів, хімічні сполуки мають сталу температуру плавлення.

Механічна суміш складається із різнорідних кристалів. Така структура являє собою дуже дрібну суміш кристалітів (зерен) компонентів. Механічні суміші утворюються у випадках, коли елементи мають обмежену розчинність і не утворюють хімічного з'єднання.

3.2 Поняття про системи, фази, компоненти

При вивченні процесів, що відбуваються в сплавах при їх перетворенні, і під час опису їх будови в матеріалознавстві використовують такі поняття: система, фаза, компонент.

Системою називають сукупність фаз, що перебувають у рівновазі при певних зовнішніх умовах (температура, тиск). Системи (сплави) бувають прості та складні.

Фазою називають однорідну за хімічним складом, кристалічною будовою та властивостями частину системи, відокремлену від інших частин системи поверхнею розділу. Фазами можуть бути рідкі і тверді розчини, хімічні сполуки. Однофазною системою є, наприклад, однорідна рідина, двофазною – механічна суміш двох видів кристалів.

Компонентами називають речовини, що утворюють систему. Компонентами можуть бути елементи (метали та неметали), а також стійкі хімічні з'єднання.

3.3 Діаграма стану сплавів

Діаграмою стану сплавів називають графічне зображення стану сплаву залежно від концентрації і температури. Діаграми стану сплавів слід навчитися розуміти, щоб:

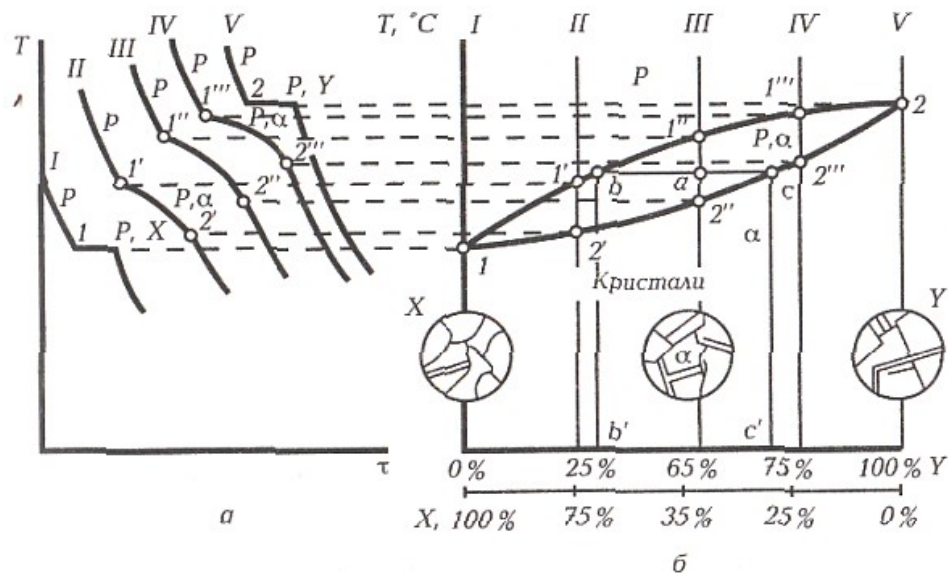
а) прогнозувати фазові перетворення у сплавах різної концентрації при зміні температури під час технологічних процесів виготовлення або в робочих умовах;

б) оцінити характер і властивості утворених у сплавах при різних температурах рівноважних фаз і структур;

в) ґрунтуючись на знаннях чинників, які впливають на процеси кристалізації та перекристалізації, передбачати можливі зміни в будові і властивостях сплаву при неминучих відхиленнях від умов рівноважної кристалізації в реальних процесах;

г) використовувати вплив фазового та структурного стану сплавів на механічні і технологічні властивості при проектуванні кінцевої структури матеріалу деталі.

Діаграми стану сплавів будують за експериментально визначеними критичними точками у сплавах різної концентрації (рисунок 3.1). Методика експериментів ґрунтується на тому, що будь-яке фазове перетворення супроводжується зміною фізико-механічних властивостей (електричного опору, питомого об'єму тощо) або тепловим ефектом. Кристалізація сплаву супроводжується значним виділенням тепла, тому моменти початку чи кінця процесу або перебігу його при сталій температурі на графіках швидкості охолодження — кривих охолодження — будуть відповідати перегинам кривої або горизонтальним ділянкам.



а – експериментальні криві охолодження сплавів I-V;

б – діаграма стану сплавів компонентів X та Y

Рисунок 3.1 – Побудова діаграми стану сплавів

Діаграми стану будують в координатах температура-концентрація. Крайні координати відповідатимуть чистим компонентам. На вертикалі концентрації кожного дослідженого сплаву наносять точки, що відповідають температурам початку і кінця кристалізації та алотропічних перетворень, З'єднані критичні точки початку кристалізації дадуть на діаграмі *лінію ліквідус*, вище якої всі сплави перебувають в рідкому стані. Відповідно точки кінця кристалізації дадуть *лінію солідус*, нижче якої всі сплави перебувають у твердому стані.

Лекція 4 (6 год)

4 Діаграма стану залізовуглецевих сплавів

4.1 Компоненти і фази системи залізо – вуглець

Компонентами залізовуглецевих сплавів є два хімічні елементи — *залізо* та *вуглець*.

Залізо — сріблясто-білий метал з температурою плавлення 1539 °С і густиною 7,87-10³ кг/м³. Йому властива добра пластичність, невисока міцність і низька твердість.

Вуглець може перебувати в сплавах у цементиті Fe₃C, у твердих розчинах проникнення, а також у вигляді графіту.

До *фаз системи* залізо – вуглець належать: рідкий розчин Р, ферит Ф, аустеніт А і цементит Ц.

Рідкий розчин Р — однорідна рідина, що складається із заліза та вуглецю. Рідкий розчин існує як окрема фаза над лінією ліквідус, а між лініями ліквідус та солідус він перебуває у рівновазі з кристалічною фазою (феритом, аустенітом або цементитом).

Ферит Ф — твердий розчин проникнення вуглецю в α-залізі. Максимальна розчинність вуглецю у фериті становить 0,02 %. Така незначна розчинність пояснюється малими розмірами порожнин в об'ємноцентрічному кубі заліза проти розмірів атома вуглецю.

Аустеніт А — твердий розчин проникнення вуглецю в γ-залізі з максимальною розчинністю 2,14 % С. Атом вуглецю

може перебувати в центрі ГЦК. Аустеніт не магнітний, досить пластичний і має твердість за Брінеллем в межах 170 ... 220.

Цементит Ц — хімічна сполука заліза з вуглецем Fe_3C , яка відповідає концентрації вуглецю 6,67 %. Твердість цементиту дуже висока (800 *HV*), його температура плавлення становить 1260 °С.

Перліт П – механічна суміш (евтектоїд) фериту і цементиту, яка утворюється при евтектоїдному розпаді аустеніту (0,8 % С).

Ледебурит Л (4,3 % С) – механічна суміш (евтектика) аустеніту або перліту та цементиту. Нижче 727 °С аустеніт перетворюється у перліт, при цьому утворюється суміш перліту і цементиту.

4.2 Діаграма стану залізо – вуглець

Діаграма стану залізо – вуглець охоплює залізовуглецеві сплави, які містять від 0 до 6,67 % С (рисунок 4.1). Сплави з концентрацією вуглецю, що перевищує 6,67 %, практично не використовуються через їхні незадовільні механічні властивості.

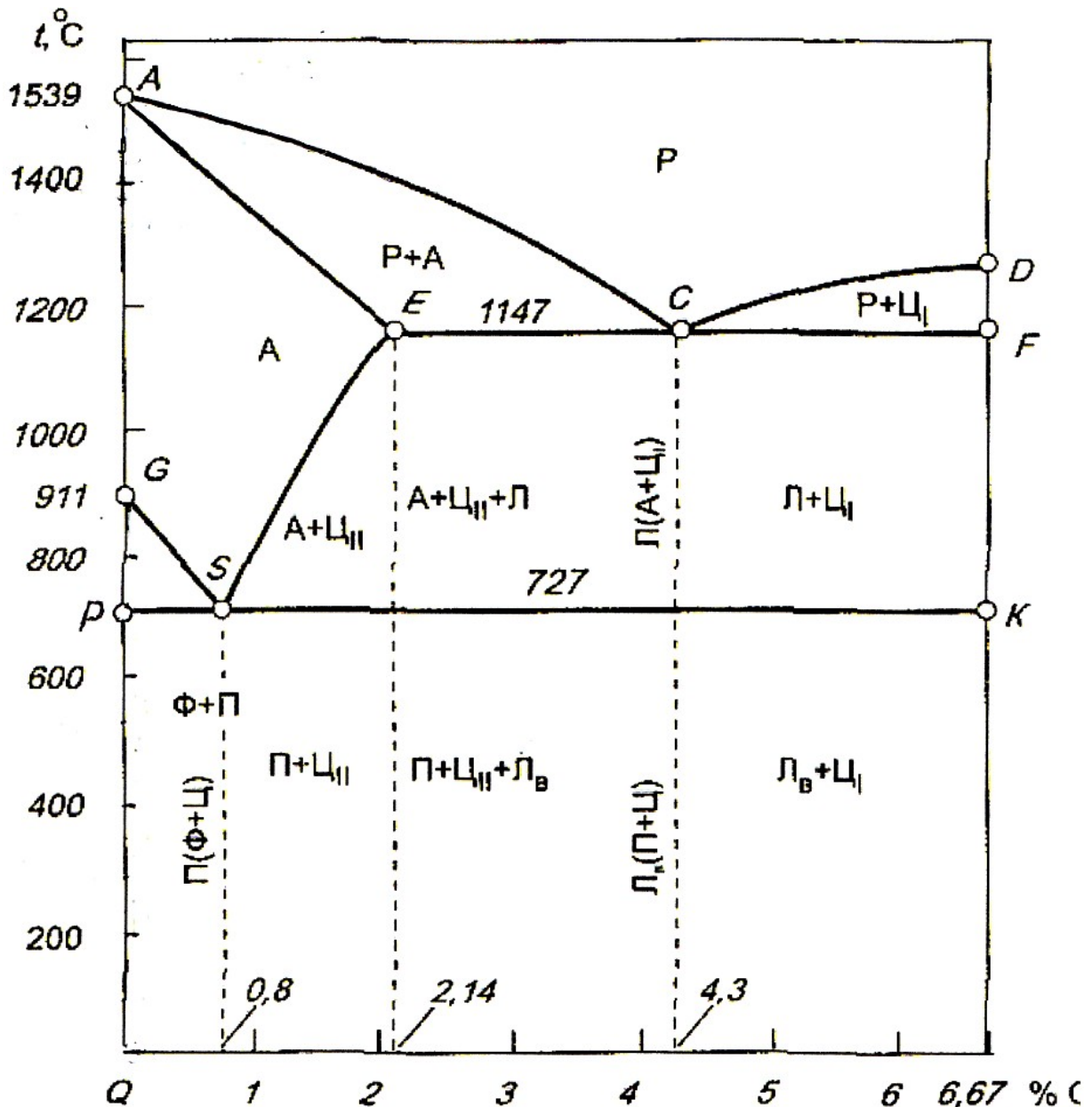
Діаграма залізо — вуглець характеризує структурні перетворення, які відбуваються в залізовуглецевих сплавах при їх охолодженні. По лінії **ліквідус АСD** маємо початок, а на лінії **солідус АЕСF** — кінець кристалізації. Тут на ділянці **АС** лінії ліквідус рідкий розчин переходить в аустеніт, а на ділянці **CD** — у цементит первинний **Ц₁**. Кристалізація аустеніту закінчується на ділянці **АЕ** лінії солідус.

При температурі 1147 °С (лінія **ЕСF**) з рідкого розчину **Р** концентрації складу точки **С** (4,3 % С) утворюється дрібна механічна суміш – ледебурит.

Отже, на лінії солідус закінчується **первинна кристалізація** і нижче від цієї лінії починається вторинна кристалізація. **Вторинна кристалізація** зумовлена поліморфізмом заліза і температурною зміною розчинності вуглецю в аустеніті. На лінії **GS** аустеніт перетворюється у ферит.

Розчинність вуглецю в аустеніті і фериті залежить від температури. Зі зниженням температури від 1147 °С (точка **Е**) до 727 °С (точка **С**) максимальна розчинність вуглецю в аустеніті

зменшується від 2,14 до 0,8 %. Вуглець виділяється із γ -заліза з утворенням *вторинного цементиту* Ц_{II} . Таке перетворення називають евтектоїдним (розпад твердого розчину). В результаті цього розпаду утворюється дуже дрібна двофазова феритно-цементитна структура фериту і цементиту, яка називається *перлітом П*. Це перетворення завершується по лінії *PSK*.



Р – рідкий сплав; А – аустеніт; П – перліт; Ф – ферит;
Ц – цементит; Л – ледебурит

Рисунок 4.1 – Діаграма стану залізобуглецевих сплавів

Залізовуглецеві сплави з концентрацією вуглецю до 2,14 % називають *сталями*. За структурою у рівноважному стані розрізняють доевтектоїдні, евтектоїдні та заевтектоїдні сталі.

Доевтектоїдні сталі містять до 0,8 % вуглецю і мають феритно-перлітну структуру у вигляді світлих зерен фериту і темних зерен перліту.

Евтектоїдна сталь містить 0,8 % вуглецю, її структура – зерна перліту, що складаються здебільшого із пластинок цементиту та фериту. Пластинки цементиту порівняно тонші й світліші.

Заевтектоїдні сталі містять від 0,8 до 2,14 % вуглецю. В структурі цих сталей є зерна перліту темного кольору і тонка світла мережа вторинного цементиту по границях зерен перліту.

Залізовуглецеві сплави з концентрацією вуглецю від 2,14 до 6,67 % називають *чавунами*. Якщо весь вуглець у чавунах перебуває у вигляді хімічної сполуки Fe_3C , то такі чавуни називають *білими*.

У структурі білих чавунів наявний ледебурит, що утворився на лінії *ECF* під час евтектичної реакції.

Чавуни, розташовані зліва від точки *C*, після закінчення первинної кристалізації мають структуру первинного аустеніту і ледебуриту, а відповідно чавуни справа від точки *C* — структуру первинного цементиту і ледебуриту.

Під час охолодження в інтервалі температур від 1147 °C (лінія *ECF*) до 727 °C (лінія *PSK*) гранична розчинність вуглецю в аустеніті зменшується від 2,14 % до 0,8 % з утворенням вторинного цементиту.

За структурою білі чавуни поділяються:

- на *евтектичні* (4,3 % C) зі структурою – ледебурит;
- *доевтектичні* (2,14...4,3 % C), структура: перліт + вторинний цементит + ледебурит;
- *заевтектичні* (4,3...6,67 % C), структура: первинний цементит + ледебурит.

ТЕМА 3. Основи термічної і хіміко-термічної обробки металів

Лекція 5 (4 год)

5 Теорія термічної обробки сталі

Термічною обробкою сталі називають процес її нагрівання до певної температури, витримування при цій температурі і подальшого охолодження із заданою швидкістю з метою зміни структури та властивостей у бажаному напрямі.

Термічно обробляють заготовки, отримані відливанням, куванням, прокатуванням, волочінням або пресуванням, зварні вироби, деталі машин та інструменти різного призначення. Термічну обробку застосовують або як проміжну операцію для поліпшення технологічних властивостей (оброблюваності тиском чи різанням), або як прикінцеву технологічну операцію для досягнення певних експлуатаційних властивостей матеріалу.

На результат термообробки впливають швидкість (час) нагрівання, температура нагрівання, тривалість (час) витримування при цій температурі та швидкість (час) охолодження, тобто основними факторами є час і температура.

5.1 Перетворення, що відбуваються у сталях під час нагрівання

Якщо нагрівати дуже повільно, то всі фазові перетворення у вуглецевих сталях описує ліва частина діаграми залізо – вуглець. Критичні температури цих перетворень позначають буквою *A* з певними індексами. Зокрема, температуру лінії **PSK** позначають через *A₁*, температури лінії **GS** — через *A₃*, а температури лінії **SE** — через *A_{cm}*. До цих позначень додають індекс *c* у разі охолодження або індекс *r* — при нагріванні, наприклад: *A_{c1}*, *A_{cm}*, *A_{r3}*. Відхилення від рівноважних умов спричинює тепловий гістерезис, тобто розбіжність критичних температур нагрівання та охолодження.

Структура доевтектоїдної сталі при невисокій температурі — ферит і перліт. При температурі *A_{c1}* (лінія **PSK**) перліт

перетворюється в аустеніт. Вище від цієї лінії буде двофазова структура: ферит + аустеніт. В інтервалі температур $A_{c1} \dots A_{c3}$ ферит поступово розчиняється в аустеніті і при A_{c3} зовсім зникає.

В евтектоїдній сталі структура перліту зберігається до температури A_{c1} , при якій перліт повністю перетворюється в аустеніт.

У заевтектоїдній сталі з перлітно-цементитною структурою при температурі A_{c1} перліт перетворюється в аустеніт, а в проміжку температур $A_{c1} \dots A_{cm}$ вторинний цементит поступово розчиняється в аустеніті.

Отже, в результаті описаних перетворень у сталях формується однофазова аустенітна структура, яка займає частину діаграми вище лінії GSE аж до лінії солідус.

У виробничих нерівноважних умовах нагрівання температура перетворення перліту в аустеніт трохи перевищує A_{c1} залежно від швидкості охолодження.

5.2 Продукти розпаду аустеніту

Під час повільного охолодження сталі по лінії PSK відбувається розпад аустеніту з утворенням фериту та цементиту в результаті дифузії вуглецю та заліза.

Утворення перліту завершується при температурі 650° . Пластинки перліту мають розмір $0,6 \dots 1,0$ мкм. Твердість перліту $180 \dots 250$ HB.

При розпаді аустеніту в інтервалі температур $650 \dots 600^{\circ}$ утворюється більш дрібнозерниста феритно-цементитна суміш з розміром зерен $0,25 \dots 0,3$ мкм. Такий дисперсний перліт називають **сорбітом**. Сорбіт має твердість $250 \dots 350$ HB.

При подальшому збільшенні швидкості охолодження в інтервалі температур $600 \dots 550^{\circ}$ утворюється феритно-цементитна суміш з розміром зерен $0,1 \dots 0,15$ мкм. Таку структуру називають **троостит**. Його твердість складає $350 \dots 450$ HB.

Перліт, сорбіт і троостит є двофазовими пластинчастими (іноді зернистими) структурами з різним ступенем дисперсності. Зі збільшенням дисперсності збільшується твердість сталі. Зі

зниженням температури розпад аустеніту сповільнюється, а при температурах нижче 500⁰ припиняється зовсім.

При різкому переохолодженні сталі відбувається тільки поліморфне перетворення γ -заліза в α -залізо без виділення вуглецю з твердого розчину. Такий пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі називають *мартенситом*. Це основна структура загартованої сталі голчастої форми розміром 0,1... 0,001 *мкм* з твердістю до 60...65 *HRC*.

Температура початку та кінця мартенситного перетворення залежить від концентрації вуглецю і легувальних елементів у сталі. Що більша концентрація вуглецю, то нижчий інтервал мартенситного перетворення. В сталях з вмістом вуглецю понад 0,5 % мартенситне перетворення зсувається в зону мінусових температур. Всі легувальні елементи, крім кобальту і алюмінію, знижують інтервал температур мартенситного перетворення. Атоми вуглецю сильно деформують ґратку α -заліза, збільшуючи міжатомні відстані. Це призводить до збільшення об'єму та виникнення внутрішніх напружень. Оскільки зі зниженням температури розпад аустеніту сповільнюється, то при швидкому охолодженні сталі в структурі залишається певна кількість неперетвореного аустеніту, який називають *залишковим аустенітом*. Залишковий аустеніт, кількість якого зростає зі збільшенням вмісту вуглецю у сталі, спричиняє неоднорідність властивостей загартованої сталі.

5.3 Термічна обробка сталей

5.3.1 Відпал сталей

Відпалом називається процес термічної обробки – нагрівання сплаву до певної температури, витримка і подальше, як правило, повільне охолодження (в печі) з метою одержання більш рівноважної структури.

Відпал першого роду. Це відпал, при якому, як правило, не відбувається фазових перетворень (перекристалізації), а якщо вони є, то не впливають на кінцеві результати, передбачені його цільовим призначенням.

Розрізняють такі різновиди відпалу першого роду: дифузійний і рекристалізаційний.

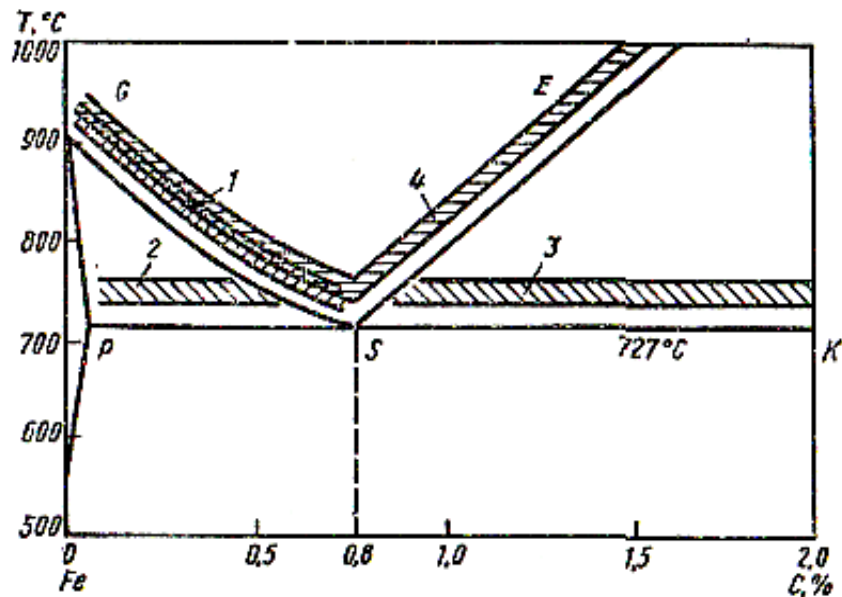
Дифузійний відпал. Це відпал зливків з вуглецевих та легованих сталей при температурі 1100...1300 °С з витримкою 20...50 годин, а зливків алюмінієвих сплавів – при 420...520 °С з витримкою 20...30 годин з метою вирівнювання хімічного складу.

Рекристалізаційний відпал. Це відпал заготовок з наклепаної сталі при температурі, що перевищує температуру початку рекристалізації, з метою усунення наклепу і одержання певної величини зерна. Його проводять після холодного деформування (прокатування, волочіння та ін.). В процесі цього відпалу зменшується міцність і твердість та відновлюється пластичність деформованого металу. Для сталей з вмістом вуглецю 0,08...0,20 % температура відпалу становить 680...700 °С, для високовуглецевих легованих сталей – 700 °С з тривалістю витримки 0,5...1,5 години.

Відпал другого роду. Це відпал, при якому фазові перетворення (перекристалізація) визначають його цільове призначення.

Розрізняють такі різновиди відпалу другого роду: повний, неповний, ізотермічний, нормалізаційний (нормалізація) (рисунок 5.1).

Повний відпал. Цьому виду відпалу піддають доєвтектоїдну сталь з метою досягнення дрібнозернистості, зниження твердості і підвищення пластичності, зняття внутрішніх напружень. Сталь нагрівають до температури на 20-30° вище точки A_{c3} . При нагріванні крупна початкова феритно-перлітна структура перетворюється в дрібну структуру аустеніту. При цьому відпалі відбувається повна фазова перекристалізація сталі. Забезпечується висока в'язкість і пластичність, а також можливість досягнення високих властивостей після остаточної термічної обробки. Повному відпалу зазвичай піддають сортовий прокат, поковки та фасонні відливки.



1 – повний відпал; 2, 3 – неповний відпал; 4 – нормалізація
 Рисунок 5.1 – Температурні режими відпалів другого роду

Неповний відпал. Цьому відпалу піддають заевтектоїдну і евтектоїдну сталь з метою перетворення пластинчатого перліту в зернистий. Для одержання зернистого перліту заевтектоїдну сталь нагрівають до температури трохи вище точки A_{c1} (до 740... 780 °С). При нагріванні відбувається перетворення перліту в аустеніт без розпаду цементиту. Після охолодження сталь має зернисту феритно-цементитну структуру.

Нормалізаційний відпал (нормалізація). Нормалізацією називають процес термічної обробки – нагрівання до температури вище точки A_{c3} для евтектоїдної або A_{cm} на 30... 50 °С для заевтектоїдної сталі з подальшою витримкою та охолодженням на повітрі. Мета нормалізації – виправлення структури сталі, подрібнення зерна, пом'якшення сталі перед обробкою різанням, загальне покращення структури перед гартуванням, вилучення сітки вторинного цементиту в заевтектоїдній сталі. Нормалізація, в порівнянні з відпалом, більш економічна операція, тому що не вимагає охолодження разом з піччю, але твердість після нормалізації вища, ніж після відпалу.

5.3.2 Гартування сталі

Гартуванням називають процес термічної обробки, що складається з нагрівання сталі до певної температури, витримки і подальшого швидкого охолодження з метою отримання нерівноважної структури. Внаслідок гартування підвищується міцність і твердість та знижується пластичність сталі. Основні параметри при гартуванні – температура нагріву і швидкість охолодження.

Температура гартування. Для вуглецевих сталей температуру гартування можна визначити за лівою нижньою частиною діаграми стану залізо – цементит.

При гартуванні доєвтектоїдні сталі нагрівають до температури на $30...50^\circ$ вище точки A_{c3} . При гартуванні заєвтектоїдні сталі нагрівають до температури на $30...50^\circ$ вище точки A_{c1} . Сталі, леговані кремнієм, вольфрамом, молібденом і титаном, гартують при більш високих температурах, щоб розчинились в аустеніті важкорозчинні карбіди. Швидкорізальні сталі гартують при $1200...1300^\circ\text{C}$, а штампові, наприклад 3Х2В8Ф, при $1050...1100^\circ\text{C}$.

Час нагрівання вибирається залежно від розмірів та конфігурації деталей. Час витримки при температурі гартування вибирають таким, щоб повністю завершилися фазові перетворення. Практично час нагрівання в електричних печах прийнято $1,5...2$ хвилини на 1 мм перерізу.

Охолодження при гартуванні має вирішальний вплив на результат гартування. Найбільш розповсюджені середовища для гартування – вода, водяні розчини солей ($\text{KNO}_2 + \text{NaNO}_3$) і лугів ($\text{NaOH} + \text{KOH}$), масло, повітря, розплавлені солі.

Вода охолоджує значно швидше, ніж масло: в 6 разів швидше при $550...650^\circ\text{C}$ і в 28 разів швидше при 200°C . Тому воду використовують для охолодження сталей з великою критичною швидкістю гартування (вуглецеві сталі), а в маслі охолоджують сталі з малою критичною швидкістю гартування (леговані сталі). Основний недолік води як охолодника – висока швидкість охолодження при занижених температурах в області утворення мартенситу, що призводить до виникнення великих структурних напружень і створює небезпеку виникнення тріщин.

Додавання до води солей та лугів підвищує її гартувальну здатність.

Масло охолоджує значно повільніше, ніж вода. Але перевага масла як охолодника полягає в тому, що воно має невелику швидкість охолодження в області температур мартенситного перетворення, тому при охолодженні в маслі небезпека утворення тріщин значно зменшується. Недолік масла – його вогнебезпечність, пригорання до поверхні деталі.

Прогартуваність сталі. Під прогартуваністю розуміють здатність сталі гартуватися на певну глибину. Глибину загартованої зони можна визначити на зламі зразка. Загартована зона має блискучу дрібнозернисту поверхню. Легувальні елементи, крім кобальту, збільшують прогартуваність сталі. Прогартуваність не слід плутати із **загартуваністю**, яка характеризується максимальним значенням твердості, яку набула сталь внаслідок гартування. Вона залежить від вмісту вуглецю. Якщо вміст вуглецю не перевищує 0,2 %, то такі сталі практично не гартуються.

Гартування в одному охолоднику. Деталь нагрівають до температури гартування і охолоджують в одному охолоднику (вода, масло). Для зниження короблення довгих циліндричних і тонких плоских деталей використовують спеціальні гартувальні машини і преси. Недолік гартування у воді – виникнення значних внутрішніх напружень, які можуть викликати тріщини.

Гартування у двох охолодниках – спочатку швидко охолоджують у сильному охолоднику (вода, водяні розчини солей або лугів), а пройшовши температурний інтервал 650...400 °С, де стійкість аустеніту мінімальна, охолоджують у слабшому охолоднику, наприклад у маслі.

При цьому складно визначити момент перенесення заготовки з одного охолодника в інший.

5.3.3 Поверхнєве гартування сталі

Поверхнєве гартування відбувається внаслідок швидкого нагрівання поверхневого шару сталі до температури вище критичної і подальшого охолодження з метою одержання в поверхневому шарі структури мартенситу.

Поверхнєве гартування використовують для підвищення зносостійкості деталей при збереженні високого опору динамічним навантаженням, зростанню міцності втомлювання. Поверхнєве гартування відбувається дуже швидко, і тому на поверхні деталі не утворюється окалини.

Методи нагрівання можуть бути різними – струмами високої частоти (СВЧ), полум'ям газової горілки, в електролітах. Нагрів СВЧ є найбільш продуктивним. При нагріванні СВЧ (2... 50 с) гартують деталі різноманітної конфігурації, повністю автоматизуючи процес гартування. Після гартування деталі піддають низькому відпуску.

Перспективним є нагрівання заготовки лазерним променем протягом $10^{-3} \dots 10^{-7}$ сек. Товщина зміцненого шару не перевищує 0,1...0,15 мм.

5.3.4 Відпуск сталі

Відпуском називають процес нагрівання загартованої сталі до температури не вище точки A_{c1} (727 °С), витримування при цій температурі і подальшого охолодження. Відпуск виконують для зниження або повного усунення внутрішніх напружень, зменшення крихкості загартованої сталі та отримання необхідної структури і механічних властивостей.

Низькотемпературний відпуск проводять з нагріванням сталі до температури 150...250° С протягом 1...3 годин. Цей відпуск знижує внутрішні напруження в сталі при збереженні високої твердості (58...63 HRC). Він використовується переважно для інструментів з вуглецевих і низьколегованих сталей, а також для деталей, які підлягають поверхневому гартуванню, цементації і нітроцементації, до яких висувають високі вимоги щодо твердості і зносостійкості. При охолодженні одержують структуру мартенситу відпуску.

Середньотемпературний відпуск здійснюють при температурах 350...500 °С. Метою цього відпуску є покращення структури трооститу. Твердість загартованої сталі при цьому знижується до 40...50 HRC, межа пружності досягає максимальної величини. Середньому відпуску підлягають ресори, пружини і ударні інструменти.

Високотемпературний відпуск здійснюють при температурах 500...650 °С. Сталь при цьому набуває структури сорбіту (сорбіт відпуску). Твердість загартованої сталі знижується до 250...350 *НВ*, міцність зменшується в 1,5-2 рази, пластичність і в'язкість збільшуються в декілька разів, внутрішні напруження повністю знімаються. Гартування з високим відпуском називають **поліпшенням**. Поліпшена сталь, у порівнянні з відпаленою або нормалізованою, має більш високі показники міцності, пластичності і в'язкості. Поліпшенню піддають вироби з конструкційних сталей марок 40, 45, 40Х, 40ХНМ, 40ХМФ тощо (півосі, колінчасті вали, шатуни, поворотні кулаки, важелі, балки передніх осей вантажних автомобілів, а також болти, гайки, гвинти тощо), які сприймають значні ударні та знакозмінні навантаження.

Лекція 6 (2 год)

6 Хіміко-термічна обробка сталі

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають процес, який являє собою поєднання термічного і хімічного впливу з метою зміни хімічного складу, мікроструктури і властивостей поверхневого шару заготовки.

Для зміни хімічного складу заготовку нагрівають у середовищі, збагаченому **дифузантом** (елементом, який насичує), витримують протягом певного часу при заданій температурі, а потім охолоджують. Під час цього відбувається дифузійне збагачення поверхневого шару заготовок неметалами або металами з метою поверхневого зміцнення.

В результаті утворюється **дифузійний шар**, що відрізняється від основного металу хімічним складом, структурою та властивостями.

Товщина дифузійного шару залежить від температури і тривалості процесу, виду утворюваного твердого розчину і концентрації дифузанта на поверхні заготовки. З підвищенням температури та часу витримки товщина дифузійного шару зростає.

ХТО змінює хімічний склад і структуру поверхневого шару, тоді як поверхневе гартування — лише структуру.

Тому різниця у властивостях поверхні та осердя в деталях після хіміко-термічної обробки більша, ніж у поверхнево загартованих деталях. Результати ХТО не залежать від форми деталей.

Проте поверхневе гартування є продуктивнішим. До найпоширеніших способів ХТО належать цементація, азотування, ціанування, нітроцементація, алітування, силіціювання та інші.

6.1 Цементація сталі

Цементацією називають процес дифузійного насичення вуглецем поверхневого шару сталевих заготовок.

Мета цементації в комплексі з подальшою термообробкою — надати поверхні деталі високої твердості та зносостійкості, зберігши в'язке осердя. Як правило, цементують сталі з низькою масовою часткою вуглецю в межах від 0,1 до 0,25 % .

Перед цементацією заготовки попередньо обробляють різанням, залишивши припуск (0,05...0,1 мм) на шліфування.

Після ХТО концентрація вуглецю найвища на поверхні заготовки (0,8...1,0 %) і поступово зменшується в глибину. Значення ефективної глибини лежить в інтервалі від 0,5 до 2 мм.

6.2 Дифузійна металізація

Дифузійна металізація — дифузійне насичення поверхневих шарів переважно сталевих виробів різними металами (алюмінієм, хромом) і металоїдами (кремній, бор) при високій температурі. Дифузійна металізація зумовлює підвищення корозійної тривкості, жаро- і зносостійкості.

Дифузійне насичення виробів алюмінієм з метою підвищення жаростійкості називають *алітуванням*. Алітують сталі з 0,1...0,2 % С. За наявності кисню на поверхні алітованого виробу формується щільна плівка оксиду алюмінію Al_2O_3 , яка захищає виріб від взаємодії з середовищем до температури 900 °С.

Хромування — дифузійне насичення хромом поверхонь переважно сталевих виробів з метою підвищення до 800 °С жаростійкості, корозійної тривкості (у воді, морській воді та азотній кислоті) та поверхневої твердості. Глибина дифузійного шару 0,2...0,25 мм. Підвищенню поверхневої твердості до 1200...1300 HV сприяє вуглець у сталі в кількості понад 0,3 %, який утворює карбіди заліза і хрому.

Хромують вироби, що працюють в агресивних середовищах в умовах спрацювання.

Силіціювання – насичення сталі кремнієм. При цьому підвищується корозійна стійкість виробів, однак цей вид хіміко-термічної обробки широко не використовується в техніці.

ТЕМА 4. Інструментальні матеріали

Лекція 7 (4 год)

7 Леговані сталі

Леговані сталі — це сплави на основі заліза та вуглецю, у складі яких є легувальні елементи.

Легувальними називаються хімічні елементи, які спеціально вводять у сталь, щоб змінити її структуру та властивості. Найчастіше використовують такі легувальні елементи, як Cr, Ni, Mo, W, Co, Cu, Ti, Zr, Nb, Al, а також Mn і Si, якщо масові частки двох останніх перевищують відповідно 0,8 і 0,5 %. Легувальні елементи дорожчі від заліза, тому вартість легованих сталей вища, нерідко значно вища за вартість вуглецевих сталей.

Поєднуючи легування з термічною обробкою, можна отримати бажану структуру, отже, і механічні, технологічні, фізичні або хімічні властивості.

Тому використання таких сталей є економічно вигідним, оскільки дає змогу зменшити масу механізмів і машин та збільшити їх надійність і довговічність.

7.1 Вплив легувальних елементів на властивості сталей

Легувальні елементи утворюють із залізом тверді розчини заміщення, впливаючи на критичні температури, при яких відбуваються поліморфні перетворення.

Нікель, марганець та кобальт розширюють зону існування γ -заліза. Починаючи з певної концентрації цих елементів, у сталях не відбуваються фазові перетворення під час нагрівання та охолодження. Такі сталі називаються *аустенітними*.

Інші легувальні елементи розширюють інтервал температур, при яких існує α -залізо. Починаючи з певної концентрації, в сталях існує тільки α -твердий розчин. Такі сталі називаються *феритними*.

Хром, нікель, молібден, марганець підвищують прогартуваність сталі, особливо коли сталь легується кількома елементами.

Легувальні елементи, крім алюмінію, кобальту і кремнію, знижують температуру початку мартенситного перетворення.

Так, 5 % марганцю знижує цю температуру до 0 °С, тому сталь має аустенітну структуру після повного охолодження.

Легувальні елементи, крім нікелю, кобальту, кремнію, алюмінію та міді, утворюють у сталі карбіди і збільшують твердість сталі.

Молібден, титан, ніобій, вольфрам та алюміній сприяють утворенню дрібнозернистої структури.

Більшість легувальних елементів підвищують міцність і корозійну стійкість сталі.

Леговані сталі мають нижчу теплопровідність, особливо сталі з високим вмістом вольфраму. Тому під час термічної обробки їх потрібно повільніше нагрівати, давати більшу витримку і значно повільніше охолоджувати. Режими термообробки для кожної сталі підбирають експериментальним шляхом.

7.2 Класифікація та маркування легованих сталей

За сумарною кількістю легувальних елементів розрізняють *низьколеговані* (до 2,5 % легувальних елементів),

середньолеговані (2,5...10 %) та *високолеговані* сталі (понад 10 %).

За призначенням розрізняють конструкційні, інструментальні та леговані сталі з особливими властивостями.

Для позначення марок легованих сталей стандартами розроблена система, яка передбачає цифрово-літерний запис марки. Кожний легувальний елемент позначається літерою: А – азот; Б – ніобій; В – вольфрам; Г – марганець; Д – мідь; К – кобальт; М – молібден; Н – нікель; П – фосфор; Р – бор; С – кремній; Т – титан; Ф – ванадій; Х – хром; Ц – цирконій; Ю – алюміній. У марці записують цифрами на початку вміст вуглецю, великими літерами і цифрами за ними — вміст легувальних елементів. Вміст вуглецю в конструкційних сталях записують у сотих частках відсотка.

В інструментальних сталях вміст вуглецю записують у десятих частках відсотка. Якщо за літерою немає цифри, то вміст цього елемента не більше 1 %. Якщо вміст у сталі сірки та фосфору менший за 0,03 %, наприкінці марки записують літеру А.

7.3 Конструкційні леговані сталі

Сталі для цементації містять 0,1...0,3 % вуглецю і легувальні елементи, що підвищують межу плинності та подрібнюють зерно.

Їх використовують у стані найбільшого зміцнення, тобто після гартування та низького відпуску.

Для отримання високої зносостійкості в деталях, що труться (наприклад, зубчасті колеса, кулачки тощо), поверхневий шар робочих поверхонь цементують. Після гартування та низького відпуску робоча поверхня має твердість 58...62 HRC, а осердя — 30...42 HRC.

Хромисті сталі 15Х, 20Х, а також 15ХФ і 20ХР, додатково леговані ванадієм і бором, утворюють групу дешевих сталей нормальної міцності, їх використовують для виготовлення невеликих деталей (діаметром не більше 25 мм), що працюють при середніх навантаженнях.

Хромонікелеві сталі 12ХН3А, 20ХН3А, 20Х2Н4А використовують для виготовлення великих відповідальних

деталей, сталь 18Х2Н4МА — для деталей, що сприймають великі статичні та ударні навантаження.

Високий вміст нікелю робить ці сталі дорогими і ускладнює термічну обробку. Їх замінюють оптимально леговані хромомарганцеві сталі з титаном (18ХГТ, 30ХГТ) і молібденом (25ХГМ), які мають трохи меншу в'язкість, але успішно працюють у зубчастих колесах автомобілів масового виробництва.

Поліпшені конструкційні сталі містять 0,3...0,5 % вуглецю. Високі механічні властивості вони отримують після термічного зміцнення (гартування з високим відпуском) до структури сорбіту, їх використовують для багатьох деталей, що працюють не тільки при високих статичних, а й при циклічних навантаженнях і при роботі з ударами (вали, штоки, шатуни і тощо).

Високі механічні властивості сталі при поліпшенні можливі лише за умови високої прогартуваності і дрібного зерна.

Для цього їх легують хромом, нікелем, молібденом, ванадієм і марганцем.

Сталі 40Х, 45Х, 50Х є відносно дешевим конструкційним матеріалом. Збільшення вмісту вуглецю зменшує в'язкість і обмежує їх застосування при динамічних навантаженнях.

Дешевими є також **хромомарганцевокремністі сталі** 30ХГСА, 35ХГСА. Вони мають високі не лише механічні, а й технологічні властивості: добре зварюються всіма способами, штамнуються, прогартовуються (при діаметрі до 30...40 мм), задовільно обробляються різанням. Із них виготовляють вали, зварні конструкції, деталі рульового керування.

Хромонікелеві сталі 40ХН, 45ХН мають комплекс високих механічних властивостей у деталях діаметром 40...50 мм, а при введенні молібдену або вольфраму (40ХНМА, 38ХНЗМА, а також 18Х2Н4ВА) — до 100 мм, бо ці елементи зменшують крихкість після відпуску з малою швидкістю охолодження. З них виготовляють вали і ротори турбін, вали редукторів, що сприймають значне навантаження тощо.

Недоліком цих сталей є висока вартість, низька оброблюваність різанням і схильність до утворення флокенів (внутрішніх тріщин).

Ресорно-пружинні сталі. Для забезпечення високої межі пружності, витривалості та міцності у сталь, крім 0,5...0,7 % вуглецю, вводять марганець, кремній, ванадій та хром. Деталі піддають гартуванню та середньому відпуску. Зі сталей 55С2, 60С2, 70С3А виготовляють пружини та ресори товщиною до 18 мм.

Для ресор легкових автомобілів, пружин клапанів та інших відповідальних пружин, які працюють при температурах до 300 °С, використовують сталі 50ХГ, 55ХГР, 50ХФА, 50ХГФА. Для великих і особливо відповідальних пружин та ресор використовують сталі 60С2ХА, 70С2ХА, 60С2ХФА, 60С2Н2А.

Для пружин, що працюють при високих температурах у корозійному середовищі застосовують сталі 30Х13, 40КХНМ, 44НХТЮ, 68НХВКТЮ, 12Х18Н9Т та ін.

Для виготовлення деталей підшипників кочення, що працюють в умовах високих контактних навантажень, використовують **підшипникові сталі**. Їх маркують літерами "ШХ" та цифрою, що показує вміст хрому в десятих частках відсотка, а також літерами наявних, крім хрому, легувальних елементів.

У цих сталях вміст вуглецю сягає 0,95...1,05 %. Сталі ШХ6, ШХ9, ШХ15 призначені для виготовлення деталей підшипників з розміром перерізу 10...20 мм, а сталі ШХ15СГ, ШХ20СГ — для деталей з більшим перерізом, бо вони прогартовуються на глибину понад 80 мм.

7.4 Сталі та сплави з особливими властивостями

До цієї групи належать сплави, у яких переважають такі властивості, як корозійна стійкість, жароміцність, жаростійкість, зносостійкість, особливі електричні властивості тощо.

Для підвищення жаростійкості у сталь вводять хром, алюміній або кремній. При наявності 5...8 % хрому жаростійкість зростає до 700...750 °С, при вмісті хрому 15...17 % — до 950...1000 °С, а при збільшенні його вмісту до 25 % сталь не окислюється навіть при 1100 °С. Додавши 5 % алюмінію, збільшують температуру до 1300 °С.

Жаростійкі сталі виготовляють у вигляді листів, прутків, труб і литих деталей. При виборі сталі основним параметром є температура середовища, в якому працює деталь. Наприклад, сталь 12X18H9 жаростійка до 850 °С, 15X25Т — до 1050 °С, а ливарна 15X25H9C2Л — до 1150 °С.

Нержавіючі сталі за хімічним складом поділяють на хромисті з феритною або мартенситною структурою та хромонікелеві — аустенітні. При введенні в сталь більше 12 % хрому її електрохімічний потенціал стає позитивним і вона не взаємодіє з атмосферою, прісною водою, з рядом кислот, лугів і солей. Сталі 12X13 і 20X13 застосовують для виготовлення деталей з підвищеною пластичністю, на які діють ударні навантаження (клапани гідропресів, предмети домашнього вжитку), їх гартують у маслі з температурою 1000...1100 °С і відпускають при 700...775 °С з метою укрупнення карбідів. Сталі 30X13 і 40X13 використовують для голок карбюраторів, пружин, хірургічного інструменту. Після гартування при 1000...1050 °С у маслі і низького відпускання сталь має мартенситну структуру (твердість 50...60 HRC) і достатню корозійну стійкість. Сталь 12X17 використовують у харчовій промисловості і для виготовлення посуду; сталі 15X25Т та 15X28 — для зварних деталей.

Аустенітні нержавіючі сталі, леговані хромом, нікелем або марганцем, мають достатню міцність, пластичність і добру корозієстійкість в окиснювальних середовищах. Вони немагнітні. Сталі 12X18H10Т та 12X18H12Т є стійкими при контакті з азотною кислотою. Сталі 04X18H10, 03X18H12, 10X14Г14H4Т застосовують для виготовлення тари під рідкі газу, для оболонок паливних баків ракет та інших виробів.

Жароміцні сталі здатні витримувати механічні навантаження при високих температурах. Такі сталі потрібні для виготовлення деталей котлів, газових турбін, реактивних двигунів тощо.

Для роботи при температурах, нижчих за 700...950 °С, основою сплаву вибирають залізо або кобальт, а при дуже високих (до 1500 °С) молибден та інші тугоплавкі метали. Сталі 16М, 12Х1МФ мають структуру перліту, з них виготовляють труби паронагрівачів, арматуру парових котлів тощо. Зі сталей

15X11МФ та 40X9С2 виготовляють лопатки турбін, що тривало працюють при 540°С, клапани автомобільних та авіаційних двигунів.

До сталей з особливими електричними властивостями належать магнітні сталі і сталі з високим електричним опором. Бувають магнітотверді, магнітом'які та парамагнітні сталі.

Магнітотверді сталі і сплави використовують для виготовлення постійних магнітів. Від них вимагають високих значень коерцитивної сили та залишкової індукції, а також їх стабільності у часі. Для невеликих магнітів використовують вуглецеві сталі У10, У12, для магнітів більших розмірів — сталі ЕХЗ, в яких літера "Е" показує, що сталь магнітотверда, літери й цифри — назву і вміст легувального елемента. Вміст вуглецю в них становить 0,9... 1,0 %.

Магнітом'які матеріали, навпаки, повинні мати низьку коерцитивну силу, високу магнітну проникність, малі втрати на перемагнічування. З них виготовляють якорі та полюси електротехнічних машин, магнітопроводи силових трансформаторів, статори і ротори електродвигунів тощо.

7.5 Леговані чавуни

Жароміцні чавуни легують нікелем, хромом і марганцем, вони мають аустенітну структуру, вкраплення карбідів і кулястого графіту. Ці чавуни мають високу циклічну в'язкість, добре гасять вібрації, стійкі в лугах, слабких розчинах кислот, у середовищі перегрітої водяної пари та у морській воді. Крім того, вони немагнітні й задовільно обробляються різанням. З таких чавунів виготовляють деталі, що експлуатуються при високих навантаженнях і підвищеній (до 600 °С) температурі, наприклад, вставки гільз циліндрів, головки поршнів, випускні колектори двигунів, вентилі, корпуси турбонагнітачів, газових турбін, насосів, а також немагнітні вироби. У марках жароміцних чавунів записують літеру "Ч", літери "Х", "Н", "Г" і цифри після них, що показують вміст хрому, нікелю та марганцю у відсотках, а також літеру "Ш", якщо графіт має кулясту форму.

Жаростійкі чавуни стійкі до окиснення на повітрі та інших газових середовищ при підвищеній температурі. Це досягається

легуванням графітізованих чавунів з пластинчастим або кулястим графітом алюмінієм, хромом і кремнієм, а також частково нікелем і марганцем.

При температурі середовища до 650 °С чавун легують хромом (0,5...2,7%), при температурах 800...900 °С у чавун вводять 5...6% кремнію і сприяють утворенню феритно-перлітної структури з пластинчастим або кулястим графітом. При експлуатації деталей у середовищі з температурою вище 1000 °С чавун легують хромом (23...32%) та алюмінієм (19...25%). У марках цих чавунів записують літери "ЖЧ", а також "С", "Х" або "Ю" з цифрами через дефіс, які показують вміст кремнію, хрому і алюмінію у відсотках, наприклад, ЖЧХ-0,8, ЖЧХ-30, а також літеру "Ш" у кінці марки для кулястої форми графіту.

Корозійної стійкості сірий чавун набуває при легуванні хромом, кремнієм, нікелем, алюмінієм та іншими елементами, які сприяють утворенню на поверхні деталі оксидної плівки, що не взаємодіє із середовищем. Деталі з таких чавунів добре працюють у середовищі кислот, лугів, морської води тощо. Хромонікелеві чавуни стійкі в розплавлених лугах і їх водних розчинах. З них виготовляють, наприклад, котли для розплавлення каустичної соди. Корозійна стійкість зростає при зменшенні розмірів графітних вкраплень. У марках цих чавунів записують літери СЧЩ ("Щ" — стійкість у середовищі лугів) і через дефіс номер сплаву, наприклад, СЧЩ-1, СЧЩ-2.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Попович В.В., Попович В.В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. – Львів: Світ, 2006.
- 2 Попов Л.Н. Строительные материалы и детали. – М.: Стройиздат, 1986.
- 3 Кузьмин Б.А. и др. Технология металлов и конструкционные материалы. – М.: Машиностроение, 1989.
- 4 Никифоров В.М. Технология металлов и конструкционные материалы. – М.: Высшая школа, 1986.
- 5 Середюк В.С. Лабораторні роботи з технології конструкційних матеріалів. – Новоград-Волинський: НВПЕТ, 2009.
- 6 Середюк В.С. Практичні роботи з технології конструкційних матеріалів. – Новоград-Волинський: НВПЕТ, 2009.

