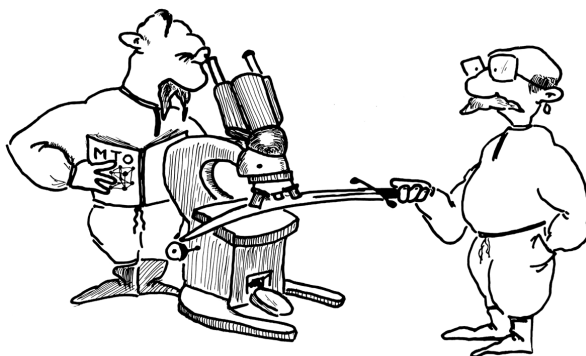


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт із дисципліни
“Матеріалознавство ” для студентів спеціальностей
131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве
машинобудування», 136 «Металургія» усіх форм навчання

Частина I



Запоріжжя, 2019

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Матеріалознавство» для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 136 «Металургія» усіх форм навчання: частина I / Укл: С.Б. Беліков, І.М. Лазечний, Л.П. Степанова, О.В. Лисиця. Малюнки – М.М. Бриков, д.т.н. Комп'ютерний набір та графіка – О.В. Лисиця, Г.Г. Трикоз – Запоріжжя: НУЗП, 2019. – 58 с.

Укладачі: С.Б. Беліков, д.т.н., професор,
І.М. Лазечний, к.т.н., доцент,
Л.П. Степанова, к.т.н., доцент,
О.В. Лисиця, старш. викладач.

Рецензент: Гіржон В.В. – зав. кафедри «Фізика твердого тіла»
ЗНУ, д. ф.- м.н., професор.

Відповідальний
за випуск: В.Ю. Ольшанецький, д.т.н., професор

Затверджено
на засіданні кафедри ФМ
Протокол № 6
від «14» березня 2019 р.

Рекомендовано
до видання НМК інженерно-
фізичного факультету
Протокол № 8
від «14» травня 2019 р.

ЗМІСТ

ЧАСТИНА І

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 Методи дослідження металів та сплавів.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 Макроскопічний та мікроскопічний методи дослідження металів та сплавів.....	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 Вплив пластичної деформації та рекристалізації на структуру і твердість сталі.....	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 Залізовуглецеві сплави. Мікроскопічне дослідження структури та властивостей відпалених вуглецевих сталей.....	36
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 Мікроскопічне дослідження структури та властивостей чавунів.....	50

ЧАСТИНА ІІ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 Вивчення загартовуваності та прогартовуваності вуглецевих і легованих сталей.....	61
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 Вплив температури відпускання на структуру та властивості загартованих сталей.....	74
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 Хіміко-термічна обробка (ХТО) та поверхневе гартування.....	81
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9 Вивчення структури, властивостей та призначення легованих сталей.....	91
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10 Вивчення структури, властивостей та призначення спеціальних сталей і сплавів.....	106
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11 Структура, властивості та використання кольорових металів та сплавів на їх основі.....	114

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12 Конструкційні неметалеві матеріали, їх властивості та призначення.....	126
ЛІТЕРАТУРА.....	134
Додаток А Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт із дисципліни “Матеріалознавство” в лабораторіях кафедри фізичного матеріалознавства.....	136
Додаток Б Таблиця відповідності величин твердості, визначених різними методами.....	137

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Методи дослідження металів та сплавів

Мета роботи – вивчити термічний, дилатометричний, електронномікроскопічний та рентгенівські методи дослідження; ознайомитися з будовою та принципом роботи приладів та установок, які використовуються при проведенні досліджень цими методами.

Загальні відомості

Всі методи дослідження, які застосовуються в металознавстві, поділяються на дві групи. До першої групи відносяться прямі методи дослідження, за допомогою яких вивчають структуру металів та сплавів. Деякі непрямі методи (термічний, дилатометричний і ін.) дозволяють встановити зв'язок між структурою та властивостями матеріалів.

Друга група методів дає можливість безпосередньо виявити хімічний склад матеріалу та його механічні, фізичні, магнітні або технологічні властивості. Всебічну і достатню інформацію стосовно структури та властивостей матеріалу можна отримати при використанні тільки всього комплексу методів.

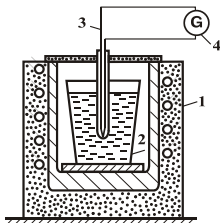
Термічний метод

Термічний метод застосовують для визначення температур фазових перетворень в металах та побудови діаграм стану сплавів. На рис. 1.1 показано схему устаткування для проведення термічного аналізу. Термопара - це спаяні разом дроти двох різних металів або сплавів. Якщо нагріти спай термопари, то виникає термоелектрорушійна сила (ТЕРС), під дією якої струм відхиляє стрілку гальванометра. Від різниці між температурою гарячого та холодних кінців термопари залежить ТЕРС, абсолютне значення якої дозволяє визначити температуру сплаву.

Сплав нагрівають до рідкого стану, а потім повільно охолоджують та фіксують температуру через кожні 20...30 с. Використовуючи ці дані, будують криві охолодження (або нагрівання) в координатах “температура-час” (рис. 1.2, а).

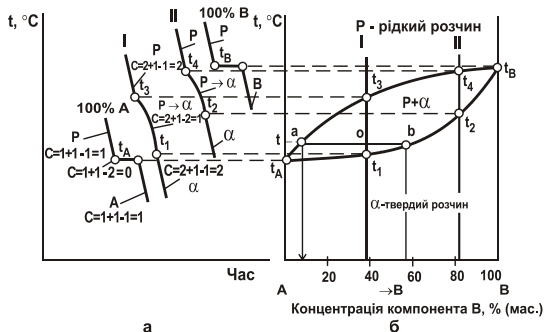
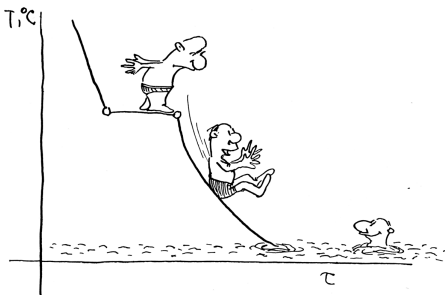
Фазові перетворення – плавлення (або кристалізація), зміна кристалічної ґратки, розчинення (або утворення) надлишкових фаз супроводжуються виділенням чи поглинанням тепла. Внаслідок цього на кривих охолодження спостерігаються температурні зупинки, коли перетворення відбувається при постійній температурі, або перегини,

якщо перетворення здійснюється в інтервалі температур (рис. 1.2). Наприклад, на кривих охолодження умовний чистий метал А кристалізується при температурі t_A , а сплав І (38%B+62%A) – в інтервалі температур $t_3...t_1$, сплав ІІ (81 % В, 19 % А) – в інтервалі $t_4...t_2$. Ці температурні точки називають критичними для певних сплавів.



1 – електропіч; 2 – тигель із металом; 3 – термопара; 4 – гальванометр

Рисунок 1.1 – Схема установки для термічного аналізу



а – криві охолодження; б – діаграма стану умовних металів А та В

Рисунок 1.2 – Побудова діаграми стану за допомогою кривих охолодження

Критичні точки використовують для побудови діаграми стану сплавів у координатах “температура–хімічний склад сплавів”. Діаграма стану – це графічні області стійкого існування фаз у залежності від хімічного складу сплавів та температури. Для побудови діаграми визначають критичні точки для цілого ряду сплавів, наносять їх в зазначеній системі координат і з’єднують плавними лініями (рис. 1.2, б). Лінії відокремлюють зони із різними фазами, точки ліній характеризують хімічний склад фаз, що знаходяться в рівновазі; температури початку та кінця фазових перетворень. Діаграми стану є рівноважними і відповідні структури можна одержати лише при повільному охолодженні сплавів. Знання діаграми необхідне для визначення фазового складу сплавів, вибору раціональних режимів термічної обробки та температур технологічних процесів.

Дилатометричний метод

В основі цього методу - зміна об’єму матеріалу при нагріванні чи охолодженні. При ізотропному розширенні зразка фіксується його довжина. Використовують метод для визначення коефіцієнтів лінійного термічного розширення металів та сплавів для різних температурних інтервалів, вивчення температур фазових перетворень у твердому стані.

За допомогою дилатометра записують дилатометричну криву, що показує зміну подовження зразка у залежності від температури (рис. 1.3) або в процесі ізотермічної витримки. Якщо у сплаві відсутні фазові перетворення, то довжина зразка змінюється монотонно (рис.1.3, інтервал температур 20...911°C). При температурі 911°C (точка **A₃**) довжина зразка значно зменшується, оскільки ОЦК гратка **α-Fe** перетворюється в більш компактну ГЦК гратку **γ-Fe**.

Подальше нагрівання приводить до збільшення довжини зразка зі структурою **γ-Fe** внаслідок теплового розширення.

Найчастіше використовують диференційні дилатометри (рис.1.4), за допомогою яких фіксується різниця подовжень зразка та еталона (сплаву з відомим коефіцієнтом лінійного термічного розширення). Зразок **1** та еталон **2** розміщують в запаяні з одного кінця кварцові трубки **3** та **4**. За допомогою кварцових стрижнів (**6** та **7**) подовження зразка та еталона передаються через металеві стрижні **8** рухомим опорам **10** та **11** трикутника, на якому розміщене дзеркало **5**; третя опора - нерухома.

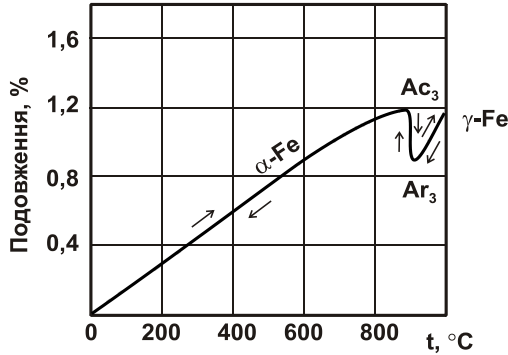


Рисунок 1.3 – Дилатометрична крива для чистого заліза

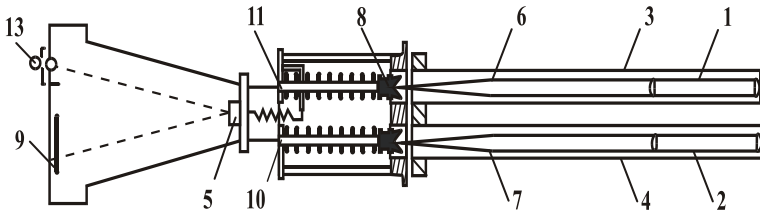


Рисунок 1.4 – Схема диференційного дилатометра

Промінь світла від джерела **13** відбивається від дзеркала **5** і фокусується на матовому склі або фотоплівці **9**. Дилатометричну криву одержують при переміщенні світлового променя внаслідок одночасного подовження зразка та еталона. Розташування кривої, а також кут її нахилу відносно горизонтальної осі визначається співвідношенням подовження зразка та еталона.

Метод електронної мікроскопії

Метод електронної мікроскопії дозволяє вивчати тонку структуру металів та сплавів при збільшеннях до 500 тис. разів і більше в залежності від мікроскопа та одержувати більш повні знання про механізми фазових перетворень, пластичної деформації та руйнування металів, вивчати дефекти кристалічної будови. В електронному мікроскопі використовують електронні промені та систему електромагнітних лінз. Мікроскоп складається із герметичної колони, в якій досягається високий вакуум (до $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па) і розташована

електронна оптика, та блоків живлення. На рис. 1.5 показана схема електронного мікроскопа для просвічування. Випромінювач електронів складається з катода **1**, фокусуючого електрода **2** та анода **3**. Конденсорна лінза **4** фокусує електронні промені на об'єкті **5**. Об'єктивна лінза **6** дає збільшене проміжне зображення в площині селекторної діафрагми **7**. Проміжна лінза **8** передає центральну ділянку зображення на предметну площину проекційної лінзи **9**, яка кінцеве зображення формує на екрані або фотопластинці **10**. Об'єктивна та проекційна лінзи збільшують приблизно у сто разів кожна.

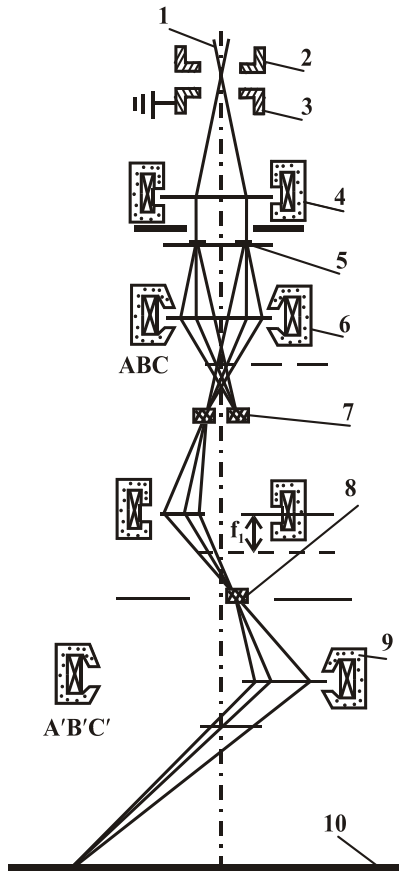


Рисунок 1.5 – Схема електронного мікроскопа

Загальне збільшення мікроскопа (приблизно до 10^6 разів) визначається електромагнітними лінзами і регулюється величиною струму в їх обмотках. Прискорювальна напруга до 100 кВ, розрізнявальна здатність (найменша частинка, деталі якої можна роздивитись - 0,2 нм, товщина фольги для просвічування не більш, ніж 10^{-7} м, (0,1...1 мкм). Таку фольгу виготовляють з більш товстої пластини при електролітичному щавленні в спеціальних розчинах. При проходженні електронів через фольгу контраст зображення виникає внаслідок розсіяння електронів на атомах, що зміщені із нормального положення в області дефекту (границі зерен, дислокації та інші дефекти кристалічної будови).

Непрямим методом за допомогою реплік можна вивчати поверхню масивних зразків. Репліка – це плівка (лакова, вугільна, оксидна тощо), яку наносять на поверхню зразка а потім відділяють від зразка і досліджують. Репліка передає рельєф поверхні, в ній залишаються частинки надлишкових фаз, склад котрих можна визначити.

В останні роки широке розповсюдження знайшли растрові електронні мікроскопи, що дозволяють безпосередньо вивчати рельєф зламів, мікроструктуру та хімічний склад зразка без виготовлення реплік або фольг, безпосередньо із плоского зразка.

Рентгенографічні методи дослідження

В залежності від характеру використання рентгенівських променів всі методи розподіляють на рентгеноструктурний, рентгеноспектральний аналізи та рентгенівську дефектоскопію.

Рентгеноструктурний аналіз заснований на дифракції, яка виникає при розсіянні рентгенівських променів атомами ґратки. Розшифровують дифракційні картини за допомогою рівняння Вульфа-Бреґа: $2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$. Дифракційні максимуми спостерігаються тоді, коли промені довжиною λ , віддзеркалені від паралельних площин з відстанню між ними d_{hkl} під кутом θ мають різницю ходу, що дорівнює цілій кількості довжин хвиль (довжина хвилі залежить від матеріалу анода рентгенівської трубки). Вимірюючи на рентгенограмах кути відбиття θ , визначають характеристику кристалічної ґратки – набір (d_{hkl}).

Дифракційна картина від монокристала характеризується закономірно розташованими точковими рефлексамі. Їх число, розташування, форма та інтенсивність дають можливість визначити орієнтацію монокристала, тип та розмір кристалічної ґратки.

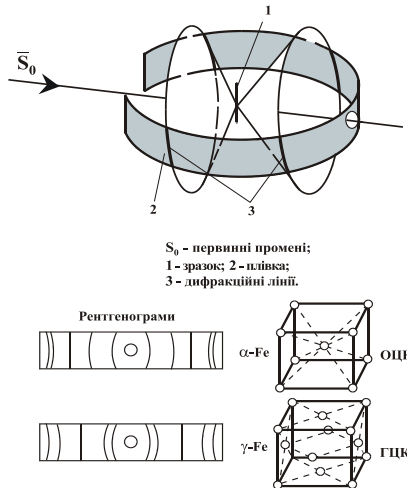


Рисунок 1.6 – Дифракційна картина від полікристала та схеми рентгенограм від ОЦК і ГЦК ґраток

Від полікристала дифракційні промені розповсюджуються у вигляді системи конічних поверхонь, тому в залежності від розташування плівки відносно первинних променів на рентгенограмі спостерігають кільця або лінії у вигляді відрізків дуг (рис. 1.6). Аналіз дифракційної картини і відповідні розрахунки дозволяють визначити: якісний та кількісний фазовий склад кристалічного зразка; тип і розмір кристалічної ґратки; внутрішні напруження; розпад пересичених твердих розчинів; орієнтацію зерен в текстурованих матеріалах тощо.

Рентгеноспектральний аналіз дозволяє визначити хімічний склад матеріалу і базується на властивості кожного елемента випромінювати характеристичні рентгенівські промені, які з'являються при опроміненні зразка електронами достатньої високої енергії. Інтенсивність променів залежить від вмісту певного елемента. Використовуючи еталони, можна проводити і кількісний аналіз наявності елементів у зразку.

Сучасні мікроаналізатори дозволяють аналізувати у мікрооб'ємах (приблизно 3 мкм^3) практично всі елементи; чутливість визначення становить $0,1 \dots 10^{-6} \%$ в залежності від порядкового номера елемента та розміру електронного зонда. Ділянка для вивчення вибирається за допомогою мікроскопа, вісь якого збігається із точкою падіння електронного зонда на зразок. При переміщенні зонда можна записати

зміну інтенсивності, яка відповідає концентрації елемента уздовж цього напрямку або площі сканування зонду. Рентгеноспектральний аналіз здійснюється за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ).

Рентгенівська дефектоскопія ґрунтується на різній здатності рентгенівських променів поглинатися при проходженні через матеріали різної товщини та щільності. Метод має високу чутливість та універсальність, застосовується для контролю якості виробів і дозволяє виявити раковини, пустоти, шпарини, непровари зварних швів, тріщини, вкраплення тощо. Схему просвічування показано на рис. 1.7. Дефекти на плівці виявляються у виді більш темних або світлих областей порівняно із фоном.

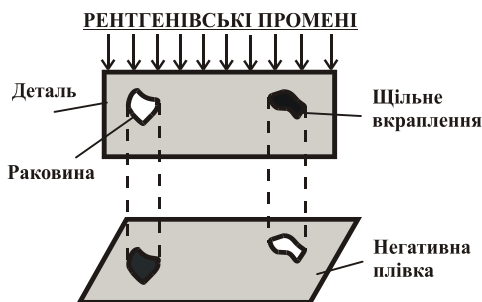


Рисунок 1.7 – Схема просвічування деталей

Щільне вкраплення поглинає промені, тому на рентгенограмі у відповідному місці буде світле забарвлення на загальному фоні. Там, де розташована раковина, спостерігається затемнення, тому що інтенсивність променів, що пройшли через деталь, більша.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Записати сутність і призначення термічного, дилатометричного, електронномікроскопічного та рентгенівських методів дослідження.

Зарисувати схеми приладів та установок, що застосовуються при використанні цих методів.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. Сутність та призначення термічного, дилатометричного, електроннооптичного та рентгенівських методів дослідження.
2. Устрій дилатометра, електронного мікроскопа.
3. Як за допомогою термічного метода побудувати діаграму стану?

4. Приготування реплік та фольг для електронномікроскопічного аналізу.

5. Особливості рентгеноструктурного та рентгеноспектрального методів дослідження.

6. Сутність методу неруйнівного контролю якості деталей за допомогою рентгенівських променів.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Для виконання роботи використовуються: нагрівальні печі з автоматичним регулюванням температури, диференційний дилатометр, електронний мікроскоп, рентгенівський дифрактометр ДРОН-1.

Вказівки з техніки безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок проведення лабораторної роботи

Ознайомитися з устроєм та принципом роботи дилатометра, електронного мікроскопа та рентгенівського дифрактометра ДРОН-1.

Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості відповідно до завдання, рис. 1.2, 1.3, 1.7.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Макроскопічний та мікроскопічний методи дослідження металів та сплавів

Мета роботи – вивчити методи макро- та мікроаналізу; дослідити характерні види макро- та мікроструктури; ознайомитися з будовою та принципом роботи металографічного мікроскопа МІМ-7.

Загальні відомості

Серед структурних методів вивчення металів найбільш поширеним є металографічний метод макро- та мікроскопічного дослідження структури. Між структурою металу та його властивостями в більшості випадків існує надійний зв'язок, тому за результатами цих досліджень можливо встановлення того, як зміни в структурі будуть впливати на механічні, фізичні та інші властивості матеріалів.

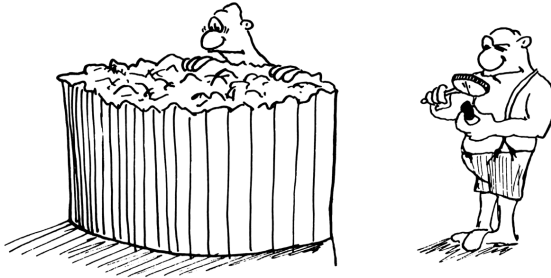
Макроскопічний метод дослідження полягає у вивченні будови металу (його макроструктури) неозброєним оком, або за допомогою лупи чи бінокулярного мікроскопа при невеликих збільшеннях (до 30...50 раз). Це дозволяє спостерігати водночас велику поверхню заготовки або деталі та одержувати таким чином загальні відомості про якість матеріалу, а також вибрати ділянки для подальшого мікроскопічного аналізу. За допомогою макроаналізу виявляють: особливості будови литого або гарячедеформованого металу; характер руйнування матеріалу; газові пухирі, усадочні раковини, вкrapлення жужелі; якість та будову зварних з'єднань; характер обробки, що застосована для надання деталі кінцевої форми та властивостей (литво, обробка тиском, різання, термічна та хіміко-термічна обробка).

Макроаналіз проводять на зламах чи на спеціальних макрошліфах, якщо макроструктуру виявляють травленням шліфованої поверхні зразка. За виглядом зламу визначають характер руйнування матеріалу, яке може бути крихке, в'язке або втомне. За структурою (за зовнішнім виглядом) *злами можуть бути волокнисті, кристалічні або змішані.*

Волокнисті злами спостерігаються при в'язкому руйнуванні матеріалу із значною пластичною деформацією під дією дотичних напружень, тому розмір і форма зерен змінюються. Такий вигляд зламу є свідченням підвищених пластичних властивостей матеріалу.

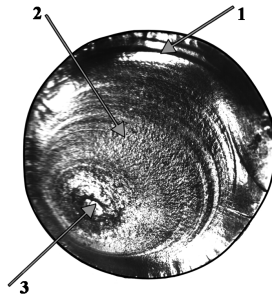
Кристалічний злам - результат крихкого руйнування під дією нормальних напружень. При цьому зерна не деформуються; зберігається

їх форма та розмір. Кристалічний злам характеризується наявністю окремих мікросколів, що дають у сукупності блискучий фон без помітних ознак деформації зразка у місці зламу. Злам називають міжкристалітним, якщо руйнування розвивається по границям зерен (кристалітів), та транскристалітним – безпосередньо через зерна. Міжкристалітний злам завжди крихкий; транскристалітний може бути як при крихкому, так і при в'язкому руйнуванні.



Втомний злам – спостерігається в деталях, що працюють при багаторазових ($10^6 \dots 10^7$ циклів) змінних і, особливо, знакозмінних навантажень (осі, вали, шестерні, ресори, пружини). За цих умов руйнування може розвиватися при початкових напруженнях, що значно нижче не лише границі міцності, а й границі плинності. Таке явище називають втомою металу і полягає воно у тому, що при багаторазових навантаженнях в місцях з найбільшою концентрацією напружень та з наявністю різних дефектів, різких переходів, перетинів виникають мікротріщини (рис. 2.1). Це призводить до збільшення концентрації напружень і, як наслідок, до подальшого розвитку тріщини (зона поступового руйнування). При цьому деталь продовжує працювати, тому стінки тріщини внаслідок взаємного тертя загладжуються. Дійсний (робочий) перетин деталі зменшується і під дією одного із максимальних навантажень деталь руйнується.

Зразок із шліфованою та травленою спеціальним реактивом поверхнею називають *макрошліфом*. Зразок спочатку шліфують за допомогою абразивного круга, потім на наждачному папері, розміщеному на плоскій основі (склі), при цьому напрямок шліфування змінюють на 90° . Шліфування закінчують на папері з дрібним зерном. Підготовлену поверхню протирають спиртом і травлять у реактиві, склад якого залежить від металу або хімічного складу сплаву. Розглянемо деякі види макроаналізу.



1 – зародження тріщини; 2 – зона поступового руйнування;
3 – зона миттєвого доламування

Рисунок 2.1 – Вид втомного зламу

Форма та розмір кристалів, що утворюються після первинної кристалізації, можуть бути різними в залежності від присутності домішок та умов кристалізації. При значній швидкості охолодження утворюється дендритна структура (дендрон – дерево) (рис.2.2). Утворення кристалів деревоподібної форми зумовлено анізотропією швидкості росту, тому в першу чергу виростають їх довгі гілки (осі першого порядку), найбільш чисті за вмістом домішок; від них ростуть осі другого порядку, на яких утворюються бічні гілки - осі третього порядку тощо. Внаслідок цього кристал розгалужується; між осями дендритів скупчуються нерозчинені домішки і утворюються дрібні шпарини, що виникають внаслідок зменшення об'єму при переході металу з рідкого стану в твердий. Дендритна будова кристалів інколи спостерігається на поверхні зливка у вигляді характерного рельєфу і особливо помітна при виготовленні мікрошліфа: світлі лінії відповідають осям дендритів, а темні - міжвісним об'ємам, що зумовлено різним травленням цих ділянок унаслідок відмінного вмісту домішок. Найчастіше правильна форма дендритів порушується при зіткненні закристалізованих об'ємів на наступних стадіях кристалізації.

В залежності від напрямку відведення тепла зерна можуть мати рівновісну або стовпчасту (втягнуту) форму. Рідкий метал у ливарній формі або виливниці контактує з їх внутрішньою поверхнею, що має значно нижчу температуру. При цьому утворюється велика кількість зародків кристалізації, що є причиною появи ливарної кірочки з дрібнозернистою структурою (рис. 2.3). Наступні шари металу

охлаждаются уже з меншою швидкістю, але при цьому відведення тепла направлено в першу чергу перпендикулярно до стінок форми, тому утворюється друга зона подовжених стовпчастих кристалів, що ростуть у напрямку, протилежному відведенню тепла.

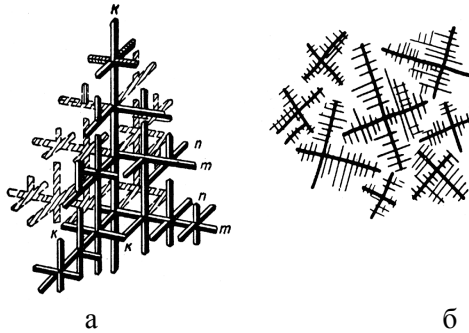
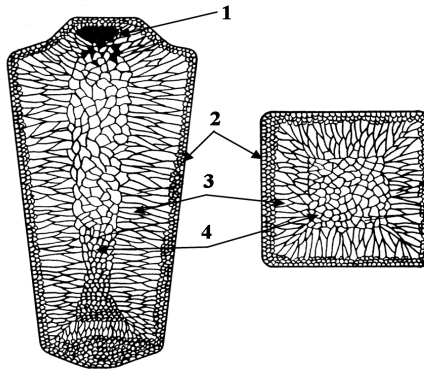


Рисунок 2.2 – Схема дендритної будови кристалу (а) та росту дендритів (б)



1 – усадочна раковина; 2 – дрібнозерниста зона;
3 – зона стовпчастих зерен; 4 – рівновісні зерна

Рисунок 2.3 – Схема будови металевого зливка

Зона, що розташована у осевій частині зливка, охолоджується з найменшою швидкістю і найбільш рівномірно у всіх напрямках. Унаслідок цього виникає зона рівновісних кристалів, що мають довільну орієнтацію. При сильному перегріванні рідкого металу чи великій

швидкості охолодження стовпчасті кристали можуть прорости до осі зливка і рівновісні кристали не утворюються.

За низької температури лиття та дуже повільному рівномірному охолодженні зона стовпчастих кристалів може бути відсутня. У верхній частині зливка виникає порожнина, що називається усадочною раковиною, появлення якої зумовлено тепловою усадкою металу при затвердінні. Це найбільш забруднена частина металу з великою кількістю мікро- та макрошпарин, пухирів.

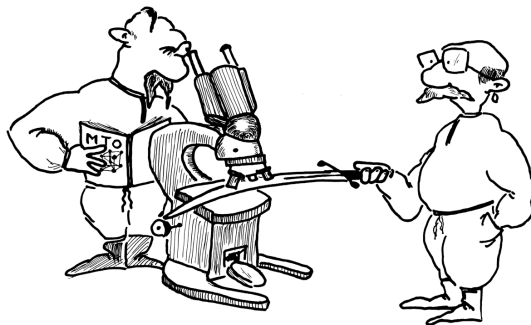
У процесі гарячої обробки тиском дендритна структура зливка руйнується і дендрити витягуються у напрямку деформації. Міжосьові об'єми, що містять неметалеві вкраплення (сульфіди, оксиди тощо), зберігають свою хімічну неоднорідність через те, що дифузія атомів домішок потребує тривалого часу. Тому при травленні макрошліфа ці об'єми окислюються швидше і темніють. Так виявляється характерна волокнистість гарячедеформованого металу. Волокниста будова характеризується значною анізотропією властивостей. Саме тому з метою підвищення надійності деталей, що працюють в умовах високих динамічних навантажень (шестерні, шатуні, колінчасті вали), схему деформації вибирають такою, щоб напрямок волокон збігався з профілем виробів, а основні зусилля діяли перпендикулярно до волокон.

При розробці технології зварювання вивчають якість зварних з'єднань. Після шліфування поверхні зразка його травлять в 10...20% водному розчині азотної кислоти протягом 3...10 хв. При цьому можна виявити розмір та форму зварного шва, наявність напливів, газових шпарин, непроварів і тріщин. На макрошліфі, вирізаному поперек шва, можна виявити його дендритну будову, зону термічного впливу, непровари, жухелеві вкраплення.

Мікроскопічний метод дослідження застосовують для вивчення мікроструктури за допомогою світлового мікроскопа при збільшеннях 50...1500 разів. При використанні мікроскопічного аналізу виявляють форму та розмір зерен, зміни в структурі після гарячої та холодної деформації, термічної та хіміко-термічної обробки; мікрodefekти металу: тріщини, шпарини, раковини; неметалеві вкраплення: сульфідів, оксидів, нітридів, алюмінатів, силікатів, графіт (у чавунах) тощо. Частіше проводять якісний аналіз, а при необхідності за допомогою спеціальних методик - кількісний.

Поверхня зразка (мікрошліфа) має бути дзеркальною для достатньо інтенсивного відзеркалення променів, для цього після операції

шліфування проводять полірування мікрошліфа на замші, фетрі чи тонкому сукні, що змочені водною суспензією дрібних частинок оксидів алюмінію, хрому, заліза. Інколи застосовують електролітичне полірування. У всіх випадках після полірування шліф промивають водою, протирають спиртом та висушують.



Перегляд нетравлених шліфів дозволяє виявити неметалеві вкраплення та мікроефекти. Структура металу при цьому не виявляється. Неметалеві вкраплення мають інший, ніж у металевій матриці, коефіцієнт відзеркалення, тому на світлому фоні вони виділяються темними ділянками (сірого, чорного, жовтуватого кольору) різної форми. За кольором та формою частинок визначають природу неметалевого вкраплення, а за їх кількістю оцінюють ступінь забрудненості металу чи сплаву.

Для виявлення структури поверхню мікрошліфа травлять в розчинах кислот, лугів, солей в залежності від хімічного складу сплаву. Так, наприклад, для сталей і чавунів застосовують травлення 2...5% розчином азотної кислоти в етиловому спирті протягом 2...5 секунд. Ступінь травлення границь зерен та структурних складових різна, тому на поверхні утворюється мікрорельєф у вигляді западин та виступів (рис. 2.4). Западини на границях зерен значно сильніше розсіюють промені, тому границі виглядають як темні лінії (див. рис. 2.4, а). У структурі перлиту, що складається з двох фаз (фериту і цементиту), ферит розчиняється швидше цементиту. Цементит виступає та відбиває більше променів і в полі зору буде світлою складовою; друга фаза (ферит), навпаки, через більше розсіювання променів буде виглядати темною. В результаті структура перлиту має вигляд темних та світлих смуг (див. рис. 2.4, б).

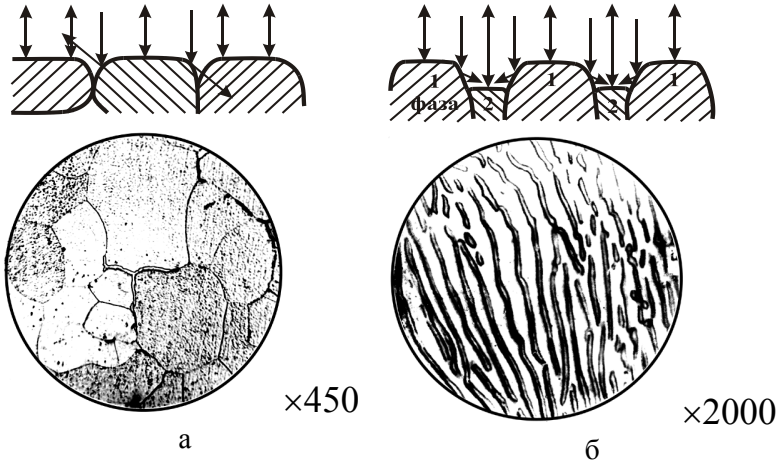


Рисунок 2.4 – Схема утворення контрасту при мікроскопічних дослідженнях та структура фериту (а) та фазової суміші - перлиту (б)

Важливою характеристикою мікроскопа є його роздільна здатність ($r=1/d$), яка визначається величиною, оберненою найменшій відстані d , на якій можливо розрізнити два сусідні елементи структури. Чим менше d , тим вище роздільна здатність і, відповідно, більше корисне збільшення мікроскопа M :

$$M = D/d,$$

де D – найменша відстань, що розрізняється людським оком ($0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$).

У оптичного мікроскопа при використанні білого світла ($\lambda = 0,4 \dots 0,8 \text{ мкм}$) d становить $0,2 \text{ мкм}$, і тому границя корисного збільшення дорівнює приблизно 1500 разів. Подальше збільшення лише укрупнює елемент структури, але не дозволяє виявити при цьому нові деталі.

Робоче збільшення мікроскопа V залежить від об'єктива та окуляра і дорівнює добутку їх збільшень:

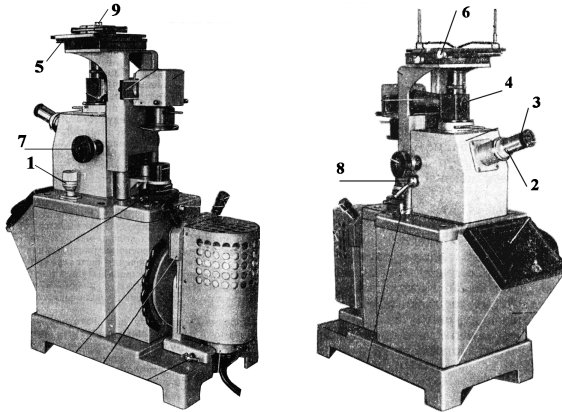
$$V = V_{\text{ОК}} \cdot V_{\text{ОБ}} = \frac{250}{F_{\text{ОК}}} \cdot \frac{L}{F_{\text{ОБ}}},$$

де $V_{\text{ОК}}$, $V_{\text{ОБ}}$ – збільшення окуляра та об'єктива, відповідно;

L – оптична довжина тубуса мікроскопа;

250 – відстань найкращого зору, мм;

$F_{\text{ОК}}$, $F_{\text{ОБ}}$ – фокусна відстань окуляра та об'єктива, відповідно.



- 1 – мікрогвинт; 2 – візуальний тубус; 3 – змінний окуляр;
 4 – ілюмінаторний тубус зі змінним об'єктивом;
 5 – предметний столик; 6 – гвинти переміщення столика;
 7 – макрогвинт; 8 – фіксуєчий гвинт; 9 – зразок
- Рисунок 2.6 – Загальний вигляд мікроскопа МІМ-7

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Коротко описати призначення макро- та мікроаналізу. Накреслити оптичну схему мікроскопа МІМ-7, вказати його основні системи та їх призначення.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. Сутність і призначення макроаналізу.
2. Що таке макроструктура ? Види її контролю.
3. Види зламів. Яким чином за видом зламу визначити характер руйнування матеріалу: крихке, в'язке або втомне ?
4. Що таке макрошліф ? Методика його приготування.
5. Макроструктура литого та гарячедеформованого металів, їх особливості.
6. Як впливає розміщення волокон після гарячої деформації на механічні властивості матеріалу виробів ?
7. Макроаналіз зварних з'єднань.
8. Сутність і призначення мікроаналізу.

9. Методика приготування мікрошліфів. Чим відрізняються технології приготування макро- та мікрошліфів?

10. Які деталі будови металу можна виявити на шліфах до та після травлення ?

11. Механізм виявлення структури при травленні.

12. Будова металографічного мікроскопа.

13. Як визначається роздільна здатність мікроскопа, його корисне та практичне збільшення ?

14. Хід променів в оптичному мікроскопі МІМ-7.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Металографічні мікроскопи МІМ-7 та МІМ-5; набір зразків для проведення макро- та мікроаналізу; альбоми з фотографіями макро- та мікроструктур; реактиви для травлення шліфів: 10%-й водний розчин азотної кислоти для виявлення макроструктури та 4%-й розчин азотної кислоти в етиловому спирті для виявлення мікроструктури.

Вказівки з техніки безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Вивчити будову литого та гарячедеформованого металів, визначити особливості макроструктури.

2. Вивчити та охарактеризувати злами зразків, за видом зламів встановити характер руйнування.

3. Виявити будову та дефекти зварних зразків після їх травлення в реактиві. Реактив налити у ванночку, зразок шліфованою поверхнею опустити у реактив і витримати 2...3 хвилини до появи бурих оксидів. Витягнути зразок з реактиву, промити проточною водою, просушити фільтрувальним папером або струменем гарячого повітря.

4. Вивчити будову мікроскопа, дослідити мікроструктури зразків залізовуглецевих сплавів.

5. Зарисувати та описати макроструктури вивчених зразків. Зарисувати і описати будову зламів.

6. Зарисувати і описати мікроструктуру досліджених зразків до та після травлення (сталі з різним вмістом вуглецю та чавуни із крапленнями графіту). Визначити робоче збільшення мікроскопа.

Зміст звіту

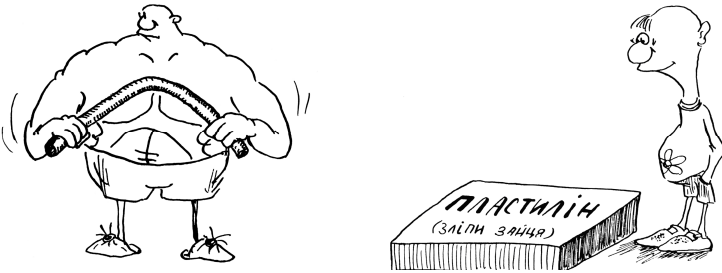
Мета роботи, загальні відомості (рис. 2.2, 2.3, 2.3, 2.5), схеми макро- і мікроструктури відповідно до порядку проведення роботи. Привести необхідні пояснення і характеристики структури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Вплив пластичної деформації та рекристалізації на структуру і твердість сталі

Мета роботи – вивчити вплив холодної пластичної деформації та подальшого нагрівання на структуру і твердість сталі 08кп (0,08% С, кипляча) та неіржавіючої сталі 08ХІ8Т1 (0,08%С, 18%Cr, 1%Ti); визначити для них температурний поріг рекристалізації та встановити температуру рекристалізаційного відпалення.

Загальні відомості



Здатність металів і сплавів деформуватися під дією зовнішніх сил використовують у промисловості для формування виробів та напівфабрикатів прокаткою, волочінням, куванням, штампуванням тощо.

Розрізняють холодну (нижче $0,3T_{пл}$), теплу ($0,3...0,5 T_{пл}$) та гарячу (вище $0,5T_{пл}$) деформації.

Пружна та пластична деформація

Під дією напружень, величина яких менше ніж границя пружності, в металах виникає пружна деформація. Якщо навантажити метал вище границі пружності, виникає пластична залишкова деформація. При розвантаженні первісна форма та розміри зразка не відновлюються, тому що відбувається незворотній зсув одних частин кристала відносно інших (рис. 3.1 в, г, д) частин кристалу. Основними механізмами зсуву при пластичній деформації є ковзання та двійникування (рис. 3.2).

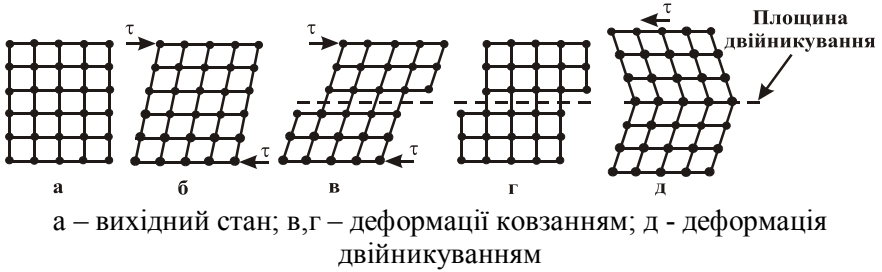


Рисунок 3.1 – Схема пружної (б) та пластичної (в, г, д) деформації

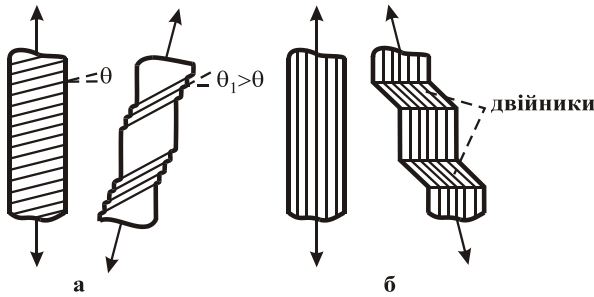


Рисунок 3.2 – Схеми пластичної деформації

Деформація *ковзанням* проходить під дією дотичних напружень, більших ніж критичні напруження, по щільно пакованим кристалографічним площинам і напрямкам (рис. 3.3).

В металах з **ГЦК** ґраткою (*γ*-залізо, нікель, мідь, алюміній тощо) - це система $(111) [\bar{1}10]$; з **ОЦК** – (*α*-залізо, хром, вольфрам, молибден тощо) – $(1\bar{1}0) [111]$, $(11\bar{2}) [111]$; з **ГЦП** ґраткою (магній, цинк, *α*-титан тощо) – $(0001) [\bar{2}110]$.

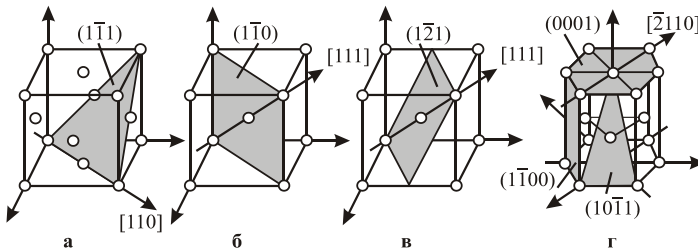


Рисунок 3.3 – Системи ковзання в ГЦК (а), ОЦК (б, в), ГЦП (г) ґратках

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

Пластична деформація може також здійснюватися *двійникуванням*. У цьому випадку частина кристалу перебудовується в дзеркально симетричне положення відносно початкового (рис. 3.1, д та 3.2, б). Двійникування відбувається у тих випадках, коли зсув ускладнено, особливо при низьких температурах та великих швидкостях деформування.

У реальних кристалах дотичні напруження, необхідні для зсуву, в 100...1000 разів менші розрахункових (теоретичних), що зумовлено присутністю великої кількості дислокацій, що полегшують зсув.

Дислокації - лінійні дефекти кристалічної будови, що виникають при кристалізації і завжди існують в кристалах. Їх наявність значно спотворює кристалічну ґратку та зменшує рівень дотичних напружень, необхідних для зсуву, за рахунок реалізації естафетного механізму розриву та відновлення міжатомних зв'язків (рис. 3.4).

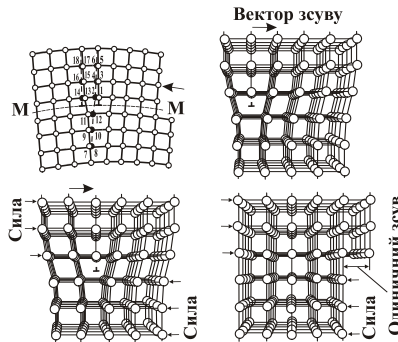


Рисунок 3.4 – Схема ковзання крайової дислокації з виходом на поверхню

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

Дислокації виникають при кристалізації металів. Значна деформація супроводжується появою великої кількості нових дислокацій. При цьому густина дислокацій зростає від $10^6 \dots 10^8$ до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Структура та властивості холоднодеформованих металів

При малих ступенях деформації (2...5 %) в полікристалах через хаотичність орієнтування зерен деформація не може проходити одночасно у всьому об'ємі металу. В першу чергу деформуються ті зерна, в яких площини легкого ковзання найбільш сприятливо розташовані відносно напрямку діючої сили (під кутом 45°). Зі зростанням деформації зменшується розорієнтація зерен, змінюється їх форма - вони витягуються у напрямку прикладеної сили, утворюють волокнисту структуру. При цьому виникає переважна кристалографічна орієнтація, так звана текстура деформації, характерна тим, що більшість зерен зорієнтовано певним кристалографічним напрямком відносно зовнішніх діючих сил (наприклад, за напрямком прокатки або волочіння). Текстура приводить до анізотропії властивостей.

Одночасно зі зміною форми в останньому виникає особлива комірчаста структура з комірками розміром 1...2 мкм із розорієнтацією 2...5°, розділеними невпорядкованими дислокаційними границями. Така структура спостерігається за допомогою електронного мікроскопа.

Передача деформації через границі зерен і комірок супроводжується ще більшим нагромадженням дислокацій, зменшенням їх рухомості; зростає опір деформації – метал зміцнюється. Явище зміцнення металів при пластичній деформації називається **наклепом** і супроводжується зростанням характеристик міцності, твердості (σ_B , $\sigma_{0,2}$, HB), зниженням пластичності (δ , ψ) та ударної в'язкості (КCU). У цьому проявляється єдність суперечних по своїй суті властивостей - міцності та пластичності: міцність визначається опором рухові дислокацій, а пластичність пов'язана з можливістю їх переміщення.

Відповідно до збільшення ступеня деформації та росту густини дислокацій збільшується їх взаємне блокування і гальмування. В результаті поступово вичерпується можливість пластичної деформації (у дуже наклепаних металах відносно видовження $\delta \approx 0\%$), а зростання прикладеного зусилля приводить до руйнування металу. Внаслідок наклепу твердість і границю міцності вдається збільшити в 1,5...3 рази, а границю плинності – в 5...7 раз.

Із збільшенням ступеня деформації підвищується електроопір, знижується магнітна проникність, густина металу та опір корозії через посилення дифузійних процесів. Зменшення густини зумовлено

зниженням компактності просторової ґратки внаслідок виникнення в ній дефектів.

Зміцнення при наклепі використовується для підвищення механічних властивостей деталей. Так, наприклад, наклеп поверхневого шару кульками, зміцнення поверхні струменем дробу, ультразвукова обробка кульками тощо підвищує опір втомі. І, навпаки, зниження пластичності при наклепі використовується з метою покращення обробки різанням в'язких пластичних матеріалів: латуней, сплавів алюмінію та інших.

Вплив нагрівання на структуру та властивості холоднодеформованого металу

Стан деформованого металу термодинамічно нестабільний. Перехід до більш стабільного стану з меншою вільною енергією відбувається при його нагріванні. Процеси, що проходять при нагріванні, супроводжуються практично повним відновленням фізичних та механічних властивостей та умовно поділяються на три температурні стадії: відпочинок, полігонізація, рекристалізація.

Відпочинок і полігонізацію називають **відновною**. Для цих стадій характерно лише часткове відновлення властивостей (рис. 3.5).

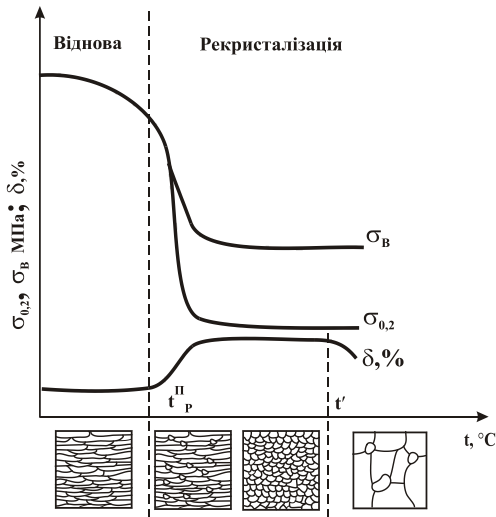


Рисунок 3.5 – Вплив нагрівання на механічні властивості та структуру холоднодеформованого металу

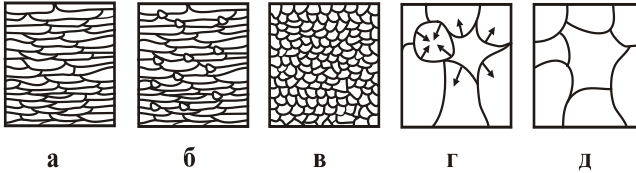
Відпочинок металу проходить при низьких температурах нагрівання ($0,1...0,3 T_{пл}$). Перерозподіл та зменшення кількості вакансій і міжвузлових атомів супроводжується зниженням рівня пружних деформацій. Основна частина пружної енергії, внесеної деформацією, пов'язана з високою густиною дислокацій, рухомість яких при температурах відпочинку обмежена.

Полігонізація розвивається при підвищенні температури нагрівання ($0,2...0,4 T_{пл}$). Звільнившись від атомів домішок, дислокації починають рухатися, при цьому їх густина значно зменшується. Надлишкові крайові дислокації трансформуються в малокутові межі, що поділяють кожне зерно на субзерна (комірки). Виникає комірчаста полігональна структура, яка при певних умовах в сплавах складної композиції може бути стабільною та сприяє збільшенню довготривалої міцності при високих температурах (жароміцності).

На стадії віднови видимих змін в мікроструктурі не спостерігається (розмір та форма деформованих зерен зберігається). Зате відновлюється рівень електричного опору, підвищується густина металу та частково зменшуються твердість і міцність (рис. 3.5). Зміну в дислокаційній структурі можна виявити лише при великих збільшеннях за допомогою електронного мікроскопа.

Рекристалізація - це зародження та ріст нових рівноважних зерен, що відрізняються від деформованої матриці досконалішою ґраткою та значно меншою густиною дислокацій (рис. 3.5, 3.6). Зародки рекристалізації виникають на ділянках з найбільшою деформацією ґратки (найчастіше на границях деформованих зерен). Чим вище ступінь пластичної деформації, тим більше виникає центрів рекристалізації. Ріст зародків реалізується міграцією границь. Останні рухаються вглибину наклепаного металу у напрямку більшої густини дислокацій і залишають за собою об'єм з відносно досконалою ґраткою. Із зникненням деформованих зерен завершується *первинна рекристалізація* (рекристалізація обробки).

Після первинної рекристалізації зникає наклеп, створений пластичним деформуванням, підвищується пластичність. Знеміцнення пояснюється усуненням спотворень кристалічної ґратки та зменшенням густини дислокацій з 10^{12} см^{-2} до 10^6 см^{-2} ; метал набуває рівноважної структури з мінімальною кількістю дефектів, відновлюються всі його фізичні та механічні властивості (див. рис. 3.5, 3.6).



а – наклепаний метал; б, в – початок та кінець первинної рекристалізації (рекристалізації обробки); г, д – збиральна рекристалізація

Рисунок 3.6 – Схема зміни мікроструктури наклепаного металу при нагріванні

Рекристалізація проходить лише після деформації, ступінь якої перевищує визначений рівень, що зветься критичним ступенем деформації (як правило, 2...15%). *Якщо ступінь деформації менше критичного, то зародження нових зерен при нагріванні не відбувається.*

Температура початку рекристалізації (T_P^{Π}) – це мінімальна температура за якої з’являються 4–5 зародків нових зерен. Вона визначається за формулою:

$$T_P^{\Pi} = \kappa T_{пл}, \left[t^{\circ}C = k(t_{пл}^{\circ}C + 273^{\circ}) - 273^{\circ} \right]$$

де κ - коефіцієнт, який залежить від чистоти металу, ступеня деформації, тривалості нагрівання і дорівнює 0,1...0,2 для металів високої чистоти; 0,4 - для металів технічної чистоти та 0,5...0,8 - для сплавів;

$T_{пл}$ - температура плавлення металу, К.

Значно впливають на температуру початку рекристалізації домішкові атоми, легувальні елементи та дисперсні частинки надлишкових фаз.

Температурний поріг рекристалізації – це технологічна характеристика, яка залежить від чистоти матеріалу і температури плавлення, в більшості випадків визначають як температуру напівзміцнення після нагрівання тривалістю 1...2 години та значною попередньою пластичною деформацією ($\epsilon > 50\%$).

З метою повного зняття наклепу та досягнення пластичності застосовують **рекристалізаційне відпалення** - нагрівання до температур на 100...200°C вищих за T_P^{Π} з наступним повільним охолодженням. Таке відпалення часто використовують як пом’якшувальну проміжну операцію при волочінні, після холодної прокатки та інших технологічних процесів.

Після завершення первинної рекристалізації підвищення температури викликає ріст одних рекристалізованих зерен за рахунок сусідніх, також рекристалізованих, шляхом міграції границь (збиральна рекристалізація). Основна рушійна сила цього процесу - зменшення зернограничної енергії внаслідок скорочення довжини границь зерен. Границя рухається у напрямку центру її кривизни (рис.3.6, г). Збільшення розмірів зерен приводить до зниження пластичності (рис. 3.5, $t > t'$).

Критичний ступінь деформації. Розмір зерна після рекристалізації

Нагрівання (вище $0,4...0,8 T_{пл}$) малодеформованих ($\varepsilon = 2...15 \%$) металів супроводжується різким ростом зерен. Такий ступінь деформації називається критичним ($\varepsilon_{крит}$). Це такий мінімальний ступінь деформації, перевищення якого приводить при нагріванні до виникнення та росту зародків рекристалізованих зерен. При нагріванні безпосередньо після критичного ступеня деформації зародки рекристалізації не утворюються, а проходить лише міграція границь зерен, за рахунок чого розмір останніх значно зростає.

Критичний ступінь деформації незначний, тому зерна деформуються неоднорідно: у першу чергу ті, у яких площини найбільш легкого ковзання збігаються з напрямком максимальних дотичних напружень. Існуючих дислокацій не вистачає для утворення зародків рекристалізації. Укрупнення зерен після нагрівання зумовлено, по-перше, ростом деяких первинних зерен під впливом градієнту наклепу, а по-друге - злиттям декількох зерен за рахунок поступового зникнення границь зерен при анігіляції дислокацій та інших дефектів. Укрупнення зерен приводить, як правило, до зниження властивостей металу, тому при обробці металів тиском критичного ступеня деформації уникають.

Після значної деформації ($\varepsilon > \varepsilon_{крит}$) швидкість появи зародків рекристалізації перевищує швидкість їх росту, що зумовлює утворення дрібних зерен. Розмір зерна залежить в основному від ступеня деформації та температури рекристалізації. Тривалість рекристалізаційного відпалення також збільшує розмір зерна, але меншою мірою, ніж температура.

Холодна та гаряча деформації

Холодною називають деформацію, яку здійснюють за температур нижчих від температури рекристалізації.

Гаряча деформація здійснюється за температур вище ніж T_P^H , тому у процесі гарячої деформації в металі одночасно спостерігаються два процеси - зміцнення і знеміцнення. В цьому випадку центри первинної рекристалізації з'являються у процесі деформації, тому рекристалізацію називають динамічною. Після гарячої пластичної деформації завершується рекристалізація і метал не наклепується. Гаряча пластична деформація, як правило, збільшує густину литої сталі, що обумовлено усуненням шпарин та раковин.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Коротко викласти загальні відомості щодо процесів холодної пластичної деформації та рекристалізації, підготувати таблиці 3.1 та 3.2, рисунки 3.1, 3.2, 3.5, 3.6.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. Механізм пружної та пластичної деформації.
2. Вкажіть системи ковзання для металів з ОЦК, ГЦК та ГЦП ґратками.
3. Типи дефектів кристалічної будови та їх вплив на властивості металів.
4. Поняття наклепу. Роль дислокацій у цьому процесі.
5. Густина дислокацій до та після холодної пластичної деформації.
6. Теоретична та реальна міцність металів.
7. Вплив холодної пластичної деформації на структуру та властивості металів.
8. Які процеси відбуваються в холоднодеформованому металі при нагріванні? Їх рушійні сили.
9. У чому полягає різниця між процесами полігонізації та рекристалізації?
10. Первинна рекристалізація, її відміна від збиральної рекристалізації.
11. Критичний ступінь деформації.
12. Температурний поріг рекристалізації та визначення температури рекристалізаційного відпалення.
13. Холодна та гаряча пластична деформація. Їх відмінні особливості.

Матеріали, інструмент, прилади та устаткування

Роботу виконують на зразках холоднокатаних та відпалених листових сталей 08кп і 08ХІ8Т1 після деформації 5, 10, 25, 60 та 80 %. Мікроструктуру зразків вивчають за допомогою мікроскопів МІМ-7; твердість (HRB) визначають на приладі ТК-2 методом Роквелла сталевую кулькою при навантаженні 981 Н (100 кгс) за шкалою В. Розмір зерна визначають, використовуючи шкалу балів за ГОСТ 5639-82.

Вказівки з техніки безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок виконання роботи

1. Визначити твердість і зарисувати мікроструктуру зразків після деформації і відпалення. Визначити номер зерна, порівнюючи виявлену структуру з еталонним зображенням зерен структури при збільшенні 100 разів. Дані записати в табл. 3.1.

2. Визначити твердість зразків сталей 08кп та 08ХІ8Т1 після холодної пластичної деформації ($\epsilon = 60\%$) та подальшого нагрівання при 400...800°C тривалістю в одну годину (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Твердість і структура сталі 08кп після холодної деформації та наступного рекристалізаційного відпалення

Ступінь деформації ϵ , %	Після холодної деформації		Після рекристалізаційного відпалення		
	Твердість HRB	Структура (зарисувати)	Твердість, HRB	Структура (зарисувати)	Номер зерна
0					
5					
10					
25					
60					
80					

Таблиця 3.2 – Твердість сталей 08кп та 08Х18Т1 після нагрівання при різних температурах

Марка сталі	Твердість, HRB					
	Після деформації ($\epsilon=60\%$)	Після нагрівання 1 год. при температурах, °C				
		400	500	600	700	800
08кп						
08Х18Т1						

Зміст звіту

1. Основні положення загальних відомостей.
2. Графік залежності твердості сталі 08кп від ступеня деформації.
3. Обґрунтувати принципи підвищення твердості з ростом ступеня деформації. Вказати, як при цьому змінюється структура.
4. Побудувати графік залежності твердості від ступеня деформації зразків сталі 08кп після рекристалізаційного відпалення.
5. Побудувати графік залежності розміру зерна після деформації і нагрівання 680°C, 1 год. в залежності від ступеня деформації. Пояснити причину аномального росту зерен при нагріванні після деформації ($\epsilon_{\text{крит}}$) та чому зразок, деформований на 80%, має після відпалювання дрібніше зерно порівняно з зерном зразка, попередньо деформованого на 60%.
6. Накреслити графік залежності твердості від температури нагрівання для зразків сталей 08кп і 08Х18Т1 ($\epsilon = 60\%$). Пояснити одержані залежності. Визначити температурний поріг рекристалізації та вибрати температуру рекристалізаційного відпалення. Встановити вплив легувальних елементів на ці характеристики.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Залізовуглецеві сплави. Мікроскопічне дослідження структури та властивостей відпалених вуглецевих сталей

Мета роботи – вивчити структурні перетворення в залізовуглецевих сплавах в залежності від їх хімічного складу та температури, а також вплив хімічного складу та структури на властивості сталей; освоїти принципи маркування сталей та основи їх вибору для деталей та інструментів.

Загальні відомості

Серед металевих матеріалів у машинобудуванні найбільш поширено використовуються сплави заліза з вуглецем – сталі та чавуни (на 90% від загальної кількості матеріалів). Визначити структуру цих сплавів у стані рівноваги, температури фазових перетворень, вибрати температуру термічної обробки дозволяють метастабільна діаграма стану “залізо-цементит” ($Fe-Fe_3C$) та стабільна діаграма стану “залізо-вуглець” ($Fe-C$).

Компоненти, фази та структурні складові залізовуглецевих сплавів

Компоненти – хімічні елементи залізо і вуглець, що утворюють сплави даної системи.

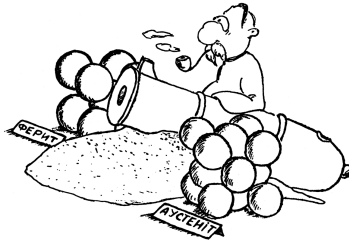
Залізо - метал з температурою плавлення $1539^{\circ}C$. Атомний радіус 0,127 нм. Залізо поліморфне. Нижче $911^{\circ}C$ має ОЦК гратку з параметром 0,286 нм при $20^{\circ}C$, в інтервалі $1392...1539^{\circ}C$ – 0,293 нм. Заповнення об'єму гратки атомами на 68%. Низькотемпературна модифікація позначається $\alpha-Fe$, високотемпературна – $\delta-Fe$. В інтервалі температур $911...1392^{\circ}C$ існує $\gamma-Fe$ з ГЦК граткою, параметри якої 0,3645 нм, заповнення об'єму гратки атомами на 74%. Між атомами заліза існує металевий тип зв'язку. Нижче $768^{\circ}C$ $\alpha-Fe$ феромагнітне, $\gamma-Fe$ - парамагнітне.

Залізо характеризується низькими рівнями міцності, твердості та високою пластичністю ($\sigma_B = 150...200$ МПа; $HB\ 60...70$; $\delta = 50...60\%$).

Вуглець – неметал з температурою плавлення $3600^{\circ}C$, атомним радіусом – 0,077 нм. Має дві модифікації: стабільну – у вигляді графіту та метастабільну – у вигляді алмазу.

В $Fe-C$ сплавах розрізняють фази: рідкий розчин (P), ферит (Ф), аустеніт (А), цементит (Ц) і графіт (Г).

Ферит – твердий розчин втілення атомів вуглецю в ОЦК гратці заліза. Розрізняють низькотемпературний α -ферит з граничною розчинністю вуглецю 0,02% при 727°C та високотемпературний δ -ферит (0,1 %C при 1499°C). Низька розчинність вуглецю у фериті обумовлена малим радіусом порожнин в ОЦК гратці (0,037 нм). Механічні властивості фериту: $\sigma_B=200\ldots250$ МПа; $\delta=40\ldots50\%$; HB80...90.



Аустеніт – твердий розчин втілення атомів вуглецю в γ -Fe (ГЦК гратці), радіус міжатомних порожнин дорівнює 0,052 нм. Цим обумовлена підвищена, порівняно із феритом, розчинність вуглецю в аустеніті – 2,14 % при 1147°C. Аустеніт має наступні механічні властивості: $\delta = 50\ldots60\%$; HB 160...200. Фаза в'язка, парамагнітна.

Тверді розчини втілення, крім вуглецю, можуть утворювати азот і водень (атомні радіуси 0,072нм та 0,0056 нм, відповідно), частково бор в ОЦК - гратці, а тверді розчини заміщення – кремній, марганець, хром, нікель, молибден, вольфрам, бор та інші метали в ГЦК - гратці.

Цементит – хімічна сполука Fe_3C , що містить 6,67%C. Гратка - складна ромбічна, характеризується металевим зв'язком між атомами заліза та ковалентним – між залізом і вуглецем. Тому цементит має високу твердість (HB $\geq$ 800), крихкість і практично нульову пластичність. Цементит - метастабільна фаза і у високовуглецевих сплавах (>2,14 %C) при дуже повільному охолодженні замість нього може утворюватися графіт.

Графіт – стабільна модифікація вуглецю, має складну гексагональну кристалічну ґратку. Відстань між атомами в одному шарі складає 0,1415 нм, між шарами – значно більше – 0,34 нм. У першому випадку зв'язок реалізується за рахунок ковалентних сил, у другому - за рахунок слабких Ван-дер-ваальсовських. Густина графіту 2,26 г/см³. Твердість 3...5 HB, значна крихкість, пластичність практично відсутня.

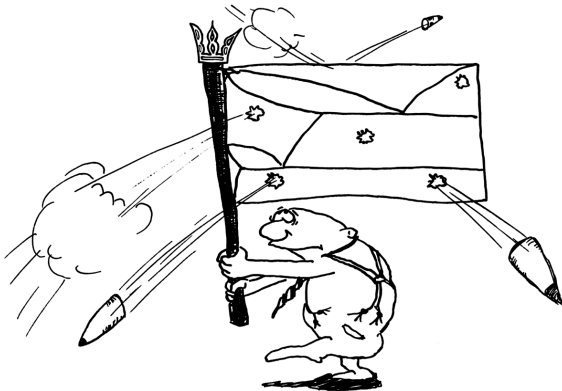
Ферит, аустеніт, цементит можуть існувати у сплавах в структурно вільному стані або входити до складу ледебуриту чи перлиту.

Ледебурит – евтектична фазова суміш цементиту та аустеніту в інтервалі температур 1147...727°C, перлиту і цементиту - при температурах нижче 727°C. Середній вміст вуглецю в ледебуриті 4,3%. Ледебурит утворюється в залізовуглецевих сплавах, що містять більше 2,14 %C. Ледебурит містить 64 % цементиту, тому він твердий ($HB \geq 600$) та крихкий.

Перлит – евтектоїдна фазова суміш фериту і цементиту, що містить 0,8%C. Властивості перлиту залежать від дисперсності ферито-цементитної суміші та форми цементиту. Грубопластинчастий перлит має властивості: $\sigma_B = 500 \dots 600$ МПа; $\delta = 8 \dots 15$ %; $HB 160 \dots 250$. Більш дисперсний перлит має більшу міцність та меншу пластичність.

Метастабільна діаграма Fe-Fe₃C

Складність діаграми **Fe-Fe₃C** (рис. 4.1) зумовлена тим, що у залізовуглецевих сплавах, окрім первинної кристалізації (*рідина* → *тверда фаза*) відбуваються процеси вторинної кристалізації в твердому стані, які пов'язані з поліморфними перетвореннями заліза та зменшенням розчинності вуглецю у фериті та аустеніті.



Точки та лінії діаграми. Точки на діаграмі визначаються температурою та концентрацією вуглецю. Точка **A** (1539°C, 0% C) - температура кристалізації (плавлення) заліза, точка **D** (1250°C, 6,67%C) - цементиту. Точки **N** (1392°C, 0%C) та **G** (911 °C, 0%C) – температури поліморфного перетворення в залізі. Інші точки діаграми будуть охарактеризовані при розгляді фазових та структурних перетворень у різних сплавах.

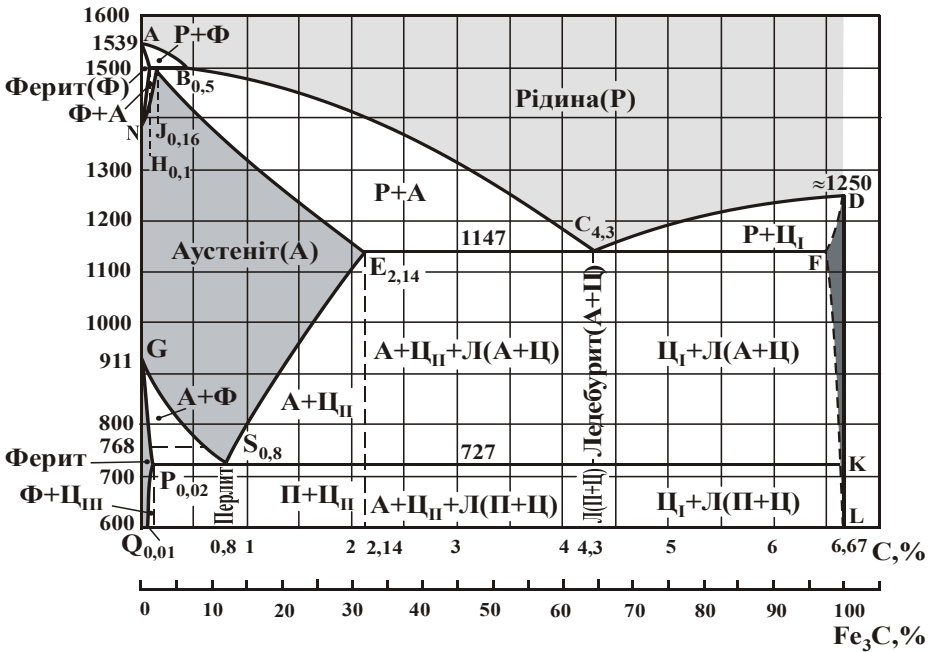
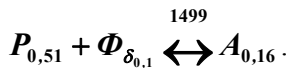


Рисунок 4.1 – Метастабільна діаграма стану $Fe-Fe_3C$

Лінії діаграми – це геометричне місце точок, що характеризують хімічний склад фаз, які знаходяться у рівновазі, температури початку та кінця фазових перетворень. З теорії кристалізації відомо, що перехід від рідкого стану в твердий відбувається не при температурі рівноваги t_0 для цих фаз, а при деякому переохолодженні Δt . Тому далі при розгляді перетворень, що проходять в реальних умовах, буде матися на увазі, що вони відбуваються при деякому переохолодженні Δt (або перегріванні) відносно рівноважних температур.

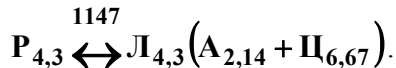
Первинна кристалізація. За лінією ліквідусу $ABCD$ починається кристалізація з рідкої фази: δ -фериту Φ_δ (AB), аустеніту A (BC) та цементиту первинного Π_I (CD). Лінія AN - границя двофазної області “рідина+ Φ_δ ”, лінія ANH – границя однофазної області Φ_δ . HJB – лінія перитектичного перетворення:



При переохолодженні нижче 1499°C внаслідок взаємодії рідини складу **В** (0,51 %С) з кристалами δ -фериту складу точки **Н** (0,1 %С) утворюється аустеніт складу точки **Ј** (0,16 %С) ($P \rightarrow A$ і $\Phi \rightarrow A$ – поліморфне перетворення).

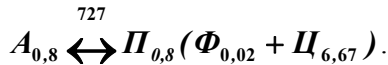
Лінія **ЈЕ** – температурна границя двофазної області $P+A$, кінець кристалізації *аустеніту*; нижче цієї лінії - однофазна область аустеніту.

ЕСF – лінія евтектичної рівноваги з утворенням нижче 1147° ледебуриту (фазової суміші **А** і **Ц**):



Вторинна кристалізація. Лінія **NH** та **NJ** - температури початку та кінця поліморфного перетворення δ -фериту в аустеніт у сплавах до 0,16 % С. У сплавах із 0,16...0,51 %С це перетворення відбувається при постійній температурі 1499°C. Лінії **GS** та **GPS** – температури початку та кінця поліморфного перетворення $A \rightarrow \Phi$, яке відбувається в інтервалі температур при безперервному охолодженні в сплавах із вмістом вуглецю до 0,8 %.

PSK – лінія евтектоїдного перетворення $A \rightarrow P$ при постійній температурі в сплавах із 0,02...6,67 % С за реакцією:



При переохолодженні нижче 727°C з аустеніту евтектоїдної концентрації (0,8 %С) утворюється перлит – фазова суміш Φ і C .

Лінії **ES** та **GPQ** – лінії граничної розчинності вуглецю в аустеніті та фериті, відповідно. У зв'язку зі зменшенням (збільшенням) вмісту вуглецю в цих фазах при охолодженні (нагріванні) лінії **ES** та **PQ** відповідають початку утворення (кінцю розчинення) цементиту вторинного в аустеніті та третинного – у фериті.

Перетворення в сплавах при охолодженні та нагріванні

Перетворення при охолодженні розглянемо на прикладі сплаву **X₁** із 0,45 % вуглецю (рис. 4.2, а). При охолодженні від температури t_0 до t_1 сплав знаходиться у рідкому стані. При t_1 починається кристалізація δ -фериту. При охолодженні в інтервалі $t_1 \dots t_2$ склад рідкої фази змінюється за лінією **AB**, а δ -фериту - за лінією **АН**, внаслідок чого при t_2 фази мають склад, необхідний для здійснення перитектичної реакції: вмісту вуглецю в рідкій фазі відповідає точка **В**, в δ -фериті –

точка **Н**. При t_2 - неваріантна рівновага, тому що в реакції приймають участь три фази: **P_B**, **Φ_H**, **A_J**. У сплаві після перетворення є надлишок рідкої фази, з якої в інтервалі $t_2...t_3$ кристалізуються кристали аустеніту. В інтервалі температур $t_3...t_4$ існує одна фаза - аустеніт.

При t_4 починається $\gamma \rightarrow \alpha$ ($A \rightarrow \Phi$) перетворення, тому в інтервалі $t_4...t_5$ сплав двофазний. Склад фериту змінюється при цьому по лінії **4'P**, аустеніту - **4S**, тобто при t_5 склад аустеніту відповідає евтектоїдному і при цій температурі утворюється перлит. В інтервалі $t_5...t_6$ сплав двофазний, його структура перлитно-феритна. Внаслідок зменшення розчинності вуглецю в фериті в інтервалі $t_5...t_6$ виділяється цементит третинний із Φ по лінії **PQ**.

Крива охолодження (див. рис. 4.2, б) побудована на підставі розрахунків ступенів свободи з використанням правила фаз.

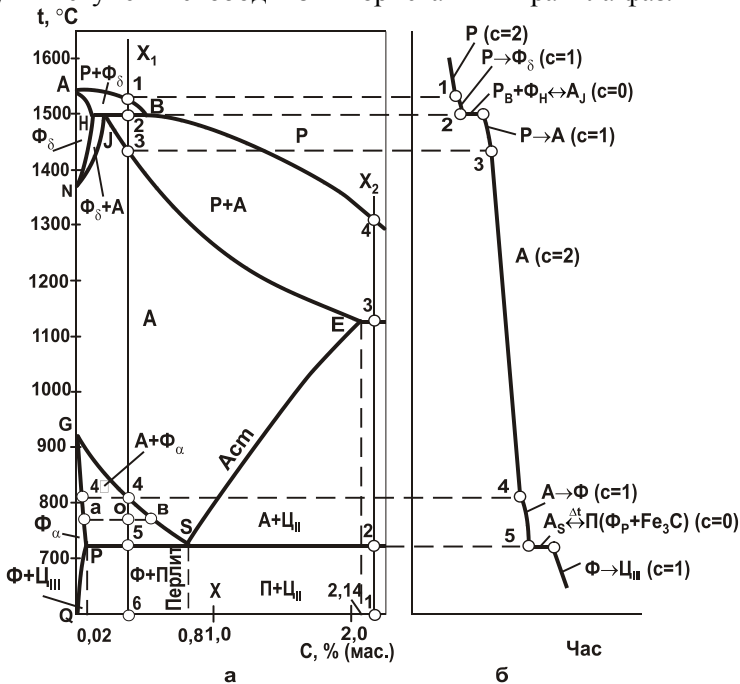


Рисунок 4.2 – Сталева частина діаграми **Fe-Fe₃C** (а) та крива охолодження сплаву **X₁** (б)

Концентрацію вуглецю в фазах при заданій температурі визначають за допомогою температурної лінії (коноди), паралельної осі

концентрацій та проведеної в області існування фаз. Визначимо, наприклад, в сплаві X_1 при $t_7 = 750^\circ\text{C}$ хімічний склад фериту та аустеніту (див. рис. 4.2, а). Для цього проведемо паралельно осі концентрацій пряму лінію (коноду) до її перетину з лініями **GS** та **GP**, що обмежують область діаграми, в якій знаходиться сплав. Проекції точок перетину визначають концентрацію вуглецю: точка **a** (0,015%С) – у фериті, точка **b** (0,6%С) – в аустеніті.

Кількісне співвідношення фаз визначимо за допомогою правила відрізків. Довжину відрізків встановимо за їх проекціями на вісь концентрацій. Так, наприклад, рис. 4.2 в сталі У10 (1,0 %С) при 600°C у рівновазі знаходяться ферит і цементит. Їх масова частка визначається як

$$Q_{\phi} = \frac{XL}{QL} \cdot Q_C \text{ та } Q_{\psi} = \frac{QX}{QL} \cdot 100 \% ,$$

де Q_C – загальна маса сплаву.

Звідки, нехтуючи кількістю вуглецю в фериті (0,01 %) при $t = 600^\circ\text{C}$, маємо:

$$Q_{\phi} = \frac{6,67 - 1,0}{6,67} = 0,85(85\%); \quad Q_{\psi} = \frac{1,0}{6,67} = 0,15(15\%)$$

Вирахована кількість **Ц** складається із структурновільного **Ц_{II}** та цементиту перлиту, ферит знаходиться у перлиті.

Перетворення при нагріванні розглянемо на прикладі сплаву X_2 із 2,2%С (див. рис. 4.2, а).

При кімнатній температурі структура сплаву складається із перлиту, ледебуриту та цементиту вторинного. З підвищенням температури до 727°C зростає концентрація вуглецю у фериті до 0,02%С внаслідок розчинення **Ц_{III}**. При деякому перегріванні відносно лінії **PSK** структурновільний перлит і перлит ледебуриту перетворюються в аустеніт. В інтервалі температур $727...1147^\circ\text{C}$ концентрація вуглецю в аустеніті збільшується від 0,8 до 2,14% за рахунок розчинення **Ц_{II}**.

При деякому перегріванні сплаву X_2 вище 1147°C евтектична складова структури (ледебурит) розплавляється – $L(A_{2,14} + \text{Ц}_{6,67}) \rightarrow P_{4,3}$. Це перетворення відбувається при постійній температурі, тому що в рівновазі знаходяться три фази: аустеніт, цементит, рідкий розчин. В інтервалі температур $t_3...t_4$ між лініями **PSK** та **BC** кристали аустеніту поступово розплавляються. Вище t_4 сплав знаходиться повністю в рідкому стані.

Вуглецеві сталі

Сталі – сплави заліза з вуглецем, що містять до 2,14 %С. Від концентрації вуглецю в сталі залежать її структура, властивості та призначення.

Класифікація сталей за структурою в стані рівноваги. Діаграма стану $Fe-Fe_3C$ дозволяє визначити структуру сталі в стані рівноваги, тобто після дуже повільного охолодження. На практиці структури, що близькі до рівноваги, досягаються при відпаленні з повільним охолодженням разом із піччю. В залежності від вмісту вуглецю сталі за структурою в рівноважному (відпаленому) стані поділяються на наступні групи:

технічне залізо – $\leq 0,02$ %С. Структура – ферит або ферит з цементитом (третинним);

доевтектоїдні сталі – $0,02\% < C < 0,8\%$ (С – вміст вуглецю в процентах). Структура – ферит (світлого кольору) та перлит (темного). З підвищенням вмісту вуглецю частка перлитної складової зростає;

евтектоїдна сталь – 0,8 % С. Структура – перлит, при невеликих збільшеннях мікроскопа – це темного кольору структура. При збільшенні 500 крат і більше виявляється двофазна пластинчаста будова перлиту (Ф+Ц);

заевтектоїдні сталі – $0,8\% < C \leq 2,14\%$. Структура – перлит і цементит (вторинний), що утворюється при повільному охолодженні по границях зерен у вигляді цементитної сітки.

Зі збільшенням в сталі вмісту вуглецю зростає кількість цементиту, що має велику твердість і крихкість, а тому його частинки є перпоною на шляху ковзання дислокацій. Унаслідок цього зростають міцність і твердість сталі, знижуються показники ударної в'язкості і пластичності. Зниження міцності заевтектоїдних сталей зумовлено наявністю крихкої сітки структурновільного цементиту. Твердість сталі монотонно зростає із збільшенням вмісту вуглецю.

Класифікація сталей за призначенням. Маркування сталей. У залежності від вмісту вуглецю сталі поділяються на конструкційні (0,02...0,8%С) та інструментальні (0,7...1,3%С). Умовною межею між ними вважають вміст вуглецю 0,7 %. В дійсності сталі з (0,7...0,8)%С можуть бути як інструментальними, так і конструкційними (наприклад, ресорно-пружинна).

Конструкційні сталі підрозділяють на сталі звичайної якості та сталі якісні. Групи сталей, їх маркування та призначення наведено в табл. 4.1-4.4.

Таблиця 4.1 – Сталі вуглецеві конструкційні звичайної якості (ДСТУ 2651:2005/ГОСТ380-2005)

Марка сталі	Вміст елементів, %					Призначення
	C	Mn	Si	≤P	≤S	
Ст0	≤ 0,23	-	-	0,07	0,06	Конструкції невідповідального призначення: загородження, прокладки, шайби тощо. Добра зварюваність.
Ст1кп	0,06 0,12	0,25 0,50	0,05	0,04	0,05	Для деталей, що вимагають високої в'язкості та низької твердості: анкерні болти, арматура тощо. Добра зварюваність.
Ст3сп	0,14 0,22	0,4 0,15	0,15 0,3	0,04	0,05	Балки, ферми, корпуси посудин, що працюють під тиском; деталі, що цементують: шестерні, вісі тощо. Добра зварюваність.
Ст5Гпс	0,22 0,30	0,8 1,2	0,15	0,04	0,05	Для деталей, що витримують невеликі напруги: вали, вісі, серги ресор тощо.
Ст6сп	0,38 0,49	0,5 0,8	0,15 0,30	0,04	0,05	Деталі підвищеної міцності: вісі, вали, тяги, пальці траків, шпінделі тощо.

Примітка. Цифри при маркуванні не відображають вміст вуглецю в сталі, однак зі зростанням цифри підвищується концентрація вуглецю в сталі, отже твердість і міцність. Літери в кінці марки означають спосіб розкислення сталі: спокійна (сп), напівспокійна (пс) та кипляча (кп). Вміст сірки ≤ 0,05 % S, фосфору ≤ 0,04 %. В марці Ст5Гпс підвищений вміст марганцю (0,8...1,2%) позначено буквою Г.

Таблиця 4.2 – Сталі вуглецеві конструкційні якісні (ГОСТ 1050-88)

Група сталі	Маркування	Призначення
Низьковуглецеві (0,05...0,08 %C)	05, 08	Мають малу міцність та високу пластичність, використовуються без термічної обробки для холодного штампування, холодного вичавлювання: кузови автомобілів, корпуси приладів, прокладки, трубки тощо.
Маловуглецеві (0,10...0,30 %C)	10, 15, 20, 25	Для деталей, що піддають цементації (ціануванню) та працюють на зношування без великих навантажень: втулки, осі кулачкових валиків, кільця ланцюгів тощо.
Середньовуглецеві (0,30...0,50% C)	30, 35, 40, 45, 50	Після нормалізації, поліпшення чи поверхневого гартування для деталей, що зазнають згинання, обертання, зношування, ударного навантаження: колінчасті та розподільні вали, плунжери, шестерні та вали редукторів тощо.
3 вмістом вуглецю 0,55-0,80%	55, 60, 65, 70, 75, 80	Після гартування та середньотемпературного відпускання мають високі пружні властивості та використовуються для виготовлення невеликого розміру у перерізі пружин, ресор тощо.

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

Таблиця 4.3 – Автоматні сталі (ГОСТ 1414-75)

Група сталі	Маркування	Призначення
Вуглецева, що містить сірку	A10, A12, A20, A30, A35	Деталі складної конфігурації з вимогами високої точності розмірів та низької шорсткості поверхні: шестерні, валики, заслінки, клапани, кільця, пальці, ходові гвинти металорізальних верстатів, деталі кріплення тощо
Вуглецева, що містить свинець	AC14, AC40	Те саме
Вуглецева, що містить сірку та селен	A35E, A45E	Те саме

Примітки:

1. Зниження зношування інструментів, отримання ламкої стружки та низької шорсткості поверхні досягається за рахунок підвищення вмісту сірки (до 0,3 %), фосфору (до 0,15%) та введення свинцю (до 0,3 %) та селену (до 0,1 %).
2. Літера “А” означає автоматна, цифри - середній вміст вуглецю в сотих частках процента, С та Е - додаток свинцю та селену, відповідно.

Таблиця 4.4 – Сталі вуглецеві інструментальні (ГОСТ 1435-99)

Група	Маркування	Призначення
1	У7, У7А, У8, У8А	Інструменти для слюсарно-монтажних робіт та обробки дерева: сокири, пили, фрези, молотки тощо
2	У9, У9А, У10, У10А	Для обробки метала: штампи для холодного штампування, фрези, зенкери, відкрутки, калібри
3	У12, У12А, У13, У13А	Інструменти, що не піддаються ударним навантаженням: напильники, шабери, інструмент для гравірування

Примітка. У маркуванні “У” позначає інструментальну вуглецеву сталь, цифри вказують на середній вміст вуглецю в десятих частках процента. Літера “А” в кінці марки означає, що сталь – високоякісна і має знижений вміст сірки та фосфору ($\leq 0,018 \% S, \leq 0,025 \% P$).

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Накреслити діаграму $Fe-Fe_3C$ (на всю сторінку). У всіх областях діаграми вказати структуру, а в квадратних дужках - фази. Коротко описати фази (**Ф**, **А**, **Ц**) та структурні складові (**П**, **Л**) залізовуглецевих сплавів; перитектичну, евтектичну та евтектоїдну реакції; маркування та призначення сталей.

Таблиця 4.5 – Класифікація заданих марок вуглецевих сталей за структурою в рівноважному стані та за призначенням

Марка сталі	Вміст С, %	Структурний клас в рівноважному стані	Структура в рівноважному стані	Призначення по групам	Кількість цементиту $Q_{ц}$, %	Твердість НВ

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. На метастабільній ($Fe-Fe_3C$) діаграмі позначити точки, концентрації, температури, структури та фази. Пояснити лінії рівноваги на діаграмі.

2. Які поліморфні перетворення відбуваються в залізі ? Вказати температури.

3. Що таке ферит, аустеніт, цементит, перлит і ледебурит? Вказати їх тип кристалічної ґратки.

4. Описати лінії діаграми $Fe-Fe_3C$ та сутність перитектичного, евтектичного та евтектоїдного перетворень.

5. Як визначити в заданому сплаві при вказаній температурі масову кількість фаз та їх хімічний склад ?

6. Які перетворення проходять при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдному (заевтектоїдному, доевтектичному, евтектичному або заевтектичному) сплаві ?

7. Що таке сталь, яким чином вуглець впливає на структуру та властивості сталей в рівноважному стані ?

8. Яким чином класифікують вуглецеві сталі в залежності від структури в стані рівноваги ?

9. Класифікація вуглецевих сталей за призначенням. Маркування вуглецевих конструкційних та інструментальних сталей.

10. Із яких сталей можна виготовити: ферму мостового крану, валик, полотно ножівки, пуансон, стамеску, шестерню, пружину тощо ? Назвати марку сталі.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Робота виконується на зразках технічно чистого заліза, відпалених вуглецевих сталей 10, 45, 60, У8, У10.

Для визначення твердості використовується прилад ТК-2, для дослідження структури - оптичні мікроскопи МІМ-5 та МІМ-7.

Вказівки з техніки безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Провести мікроскопічне дослідження шліфів. Порівнянням мікроструктури зразків із фотографіями структур різних залізобуглецевих сплавів, що наведені в альбомах, визначити вміст вуглецю та марку вуглецевої сталі.

2. Схематично зобразити структури переглянутих сплавів, визначити структурні складові та, користуючись довідковими даними, написати біля кожної структури хімічний склад сплаву, твердість у відпаленому стані, застосування.

3. На 4...5 зразках сталі з різним вмістом вуглецю визначити твердість на приладі ТК-2 (шкала В, навантаження 980 Н). Використавши додаток Б, перекласти значення твердості HRB в HB.

4. Класифікувати задані марки вуглецевих сталей за структурою в рівноважному стані та за призначенням. Заповнити табл. 4.5.

5. За експериментальними даними побудувати для сталей графік залежності “твердість – вміст вуглецю”. Пояснити графік.

6. Для визначеної викладачем деталі (інструменту) вибрати марку вуглецевої сталі. Визначити хімічний склад, структуру та призначення інших, вказаних викладачем, вуглецевих сталей.

7. Для вказаного сплаву при заданій температурі визначити вміст вуглецю в фазах та масову кількість кожної фази. Побудувати та пояснити криву охолодження.

Зміст звіту

Завдання п. 2, рис. 4.1, табл. 4.5; схеми мікроструктур досліджених зразків сталей, графік залежності “твердість – вміст вуглецю”; висновки і пояснення; відповідь на питання п.п. 6 та 7.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Мікроскопічне дослідження структури та властивостей чавунів

Мета роботи – вивчити структурні перетворення в чавунах у залежності від їх хімічного складу та температури, а також вплив хімічного складу та структури на властивості чавунів; освоїти принцип маркування чавунів та основи їх вибору для деталей і конструкцій.

Загальні відомості

Чавуни – це залізовуглецеві сплави, що містять більше 2,14%С. Вони кристалізуються з утворенням евтектики, мають малий інтервал температур кристалізації і тому характеризуються добрими ливарними властивостями: великою рідкотекучістю, малою лінійною усадкою. Це дозволяє одержувати відливки складної форми з малою товщиною стінок. Вуглець у чавунах може розчинятися у фериті і аустеніті, знаходитися у вільному стані (графіті), у зв'язаному вигляді (цементиті) або у частково зв'язаному та переважно у вільному стані. В залежності від цього та від форми графіту, яка зумовлюється технологією виробництва, розрізняють білі, половинчасті, сірі, високоміцні та ковкі чавуни.

Білий чавун. У білих чавунах весь вуглець знаходиться у зв'язаному вигляді (Fe_3C), а процеси кристалізації та структурні перетворення в них визначаються за допомогою метастабільної діаграми ($Fe-Fe_3C$). Вміст вуглецю визначає структурні класи білих чавунів: доевтектичні ($2,14\% < C < 4,3\%$), евтектичні ($4,3\%$), заевтектичні ($> 4,3\%$).

Велика кількість цементиту в структурі білих чавунів (64% при вмісті 4,3%С) зумовлює їх значну твердість (НВ 540...550), низьку пластичність та неможливість обробки різанням. Їх велика твердість забезпечує підвищену зносостійкість в умовах абразивного зношування. Відливки з відбіленого чавуну мають у поверхневому шарі структуру білого чавуну, а в серцевині - сірого або високоміцного. Із білого та відбіленого чавунів виготовляють прокатні валки, кулі млинів для помолу руди. Білі та відбілені чавуни не маркуються.

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

Сірий чавун (ГОСТ 1412-85). У сірих чавунах графіт на площині шліфа має пластинчасту форму. Кристалізація та структурні перетворення в цих чавунах відбуваються відповідно до стабільної діаграми ($Fe-C$) (рис. 5.1). При температурі нижче 1153°C утворюється аустенітно-графітна евтектика, а нижче 738°C - ферито-графітний евтектоїд. Технічні чавуни, окрім заліза та вуглецю, містять кремній, марганець, алюміній тощо, тобто є багатокомпонентними сплавами, в яких евтектичне та евтектоїдне перетворення відбуваються в інтервалі температур.

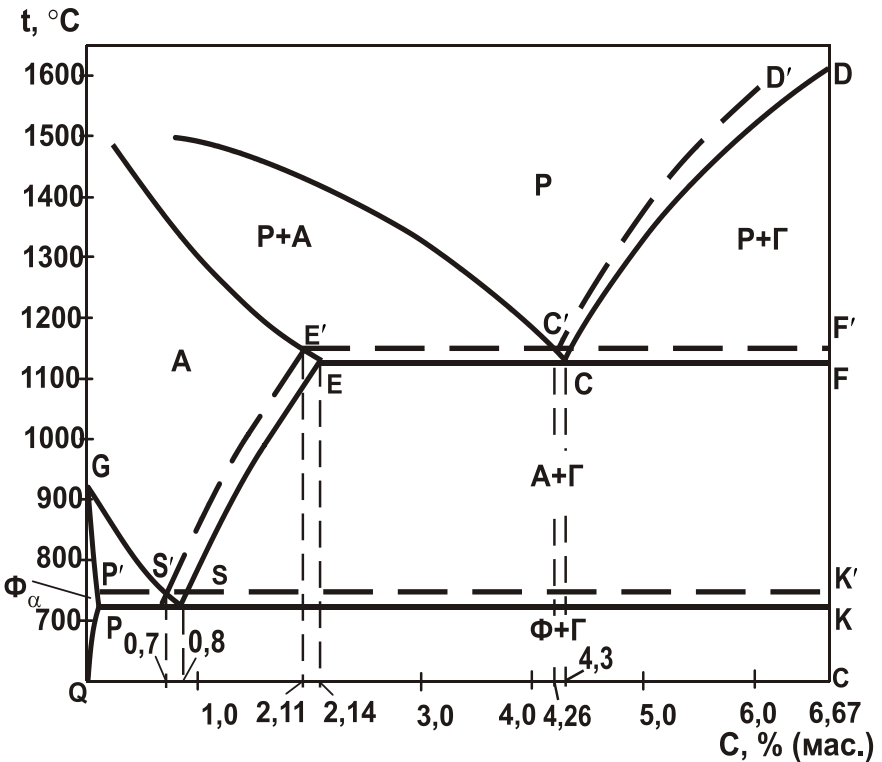


Рисунок 5.1 – Стабільна діаграма стану залізо-графіт (штрихові лінії)

В реальних умовах охолодження перетворення відрізняються від перетворень з безмежно малою швидкістю охолодження (тобто рівноважних). Структура відливок залежить від хімічного складу та швидкості охолодження при кристалізації та евтектоїдному перетворенні. Елементи-графітизатори (*кремній, нікель, мідь, алюміній*) сприяють збільшенню кількості графіту, а карбідоутворювачі (*хром, ванадій, марганець тощо*) - підвищенню кількості цементиту (відбілюванню чавуну).

Через те, що в цементиті вміст вуглецю 6,67 %, а в графіті 100%, кінетично більш ймовірно утворення Fe_3C , не дивлячись на те, що термодинамічно стабільною фазою є графіт (правило Освальда). Тому при швидкому охолодженні можливо утворення цементиту та структури білого чавуну. Зменшення швидкості охолодження сприяє процесу графітизації, тобто діє аналогічно уведенню кремнію та алюмінію.

Структура чавунних відливок визначається за допомогою діаграм, що показують залежність структури від хімічного складу чавуну та товщини (швидкості охолодження) відливок. ***У залежності від структури металеві основи сірі чавуни поділяються на:***

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

–***ферито-перлитні***: структура основи – ферит і перлит. У зв’язаному стані знаходиться $\leq 0,7\%$ вуглецю (в цементиті перлиту);

–***перлитні***: структура основи – перлит. У цих чавунах 0,7% вуглецю знаходиться в цементиті перлиту.

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

Присутність у чавунах великої кількості мікронадрізів робить їх малочутливими до концентраторів напружень, шорсткості поверхні деталей. Графіт сприяє утворенню крихкої стружки і тим поліпшує обробку чавунів різанням. Чавуни мають високу демпфірувальну

здатність (добре гасять вібрації). Крім цього, графіт - гарне мастило, у зв'язку з чим він підвищує антифрикційні властивості чавуну.

Структура металевої основи впливає на границю міцності при стисненні, твердість, зносостійкість, які підвищуються при збільшенні кількості перлиту. Ферит, навпаки, зменшує міцність та зносостійкість чавунів.

Сірі чавуни використовуються як матеріал для виготовлення мало- та середньонавантажених опор, деталей сільськогосподарських машин, верстатів, автомобілів, тракторів, станин електродвигунів тощо. Згідно ГОСТ 1412-85 сірий чавун маркується літерами СЧ та цифрами, що характеризують нижнє значення границі міцності при розтягуванні. Наприклад, чавун СЧ15 має $\sigma_B \geq 150 \text{ МПа}$ (15 кгс/мм²). Властивості чавунів, у тому числі й сірих, можуть бути значно покращені модифікуванням.

Модифікування – це введення спеціальних добавок при плавленні або при розливанні сплавів з метою поліпшення їх структури та властивостей.

За впливом на процеси кристалізації розрізняють *модифікатори I та II роду*. Модифікатори I роду у вигляді важкотопких дисперсних частинок оксидів, нітридів, карбідів тощо - це додаткові центри кристалізації (графітизації). Вони зумовлюють утворення дрібних зерен перлиту та частинок графіту малого розміру в сплаві. Для чавунів модифікатори I роду це - силікокальцій, титан, цирконій, феросиліцій або силікоалюміній (0,5...0,8 %).

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

Високоміцний чавун (ДСТУ 3925-99). Графіт у цих чавунах має глобулярну форму внаслідок модифікування магнієм чи церієм (0,03...0,07%). Така форма графіту сприяє одночасному підвищенню характеристик міцності та пластичності. Відносне видовження високоміцних чавунів у залежності від марки може змінюватися від 2 до 12%. Структура металевої основи високоміцних чавунів може бути

феритною, перлитно-феритною або перлитною. Найвища пластичність ($\delta \leq 12\%$) характерна для феритних, а найбільша твердість і міцність ($\sigma_B \geq 500$ МПа) – для перлитних високоміцних чавунів.

Високоміцні чавуни застосовуються як матеріали для відповідальних деталей, що працюють в умовах дії ударних і знакозмінних напружень та зношування: колінчасті вали, деталі прокатних станів, траверси пресів, корпуси компресорів, крупногабаритні штампи, шестерні, ступиці коліс тощо. Такі чавуни маркуються літерами ВЧ та числами. Наприклад, ВЧ420-12, ВЧ450-5, ... ВЧ1000-2, де числа – це нижня границя міцності при розтягуванні (МПа) та відносне видовження (%).

Ковкий чавун (ГОСТ 1215-79). У ковких чавунах графіт має пластівчасту форму, що є наслідком графітизаційного відпалення доєвтектичних білих чавунів (2,4...2,9 %C, 1,0...1,6 %Si, 0,3...1,0 %Mn). Графіт такої форми, в порівнянні з пластинчастим, менше знижує міцність металевої основи, тому в ковких чавунах відносне видовження досягає значень 2...12 %.

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

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

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

Чавуни – багатокомпонентні сплави, евтектоїдне перетворення в яких проходить в інтервалі 760...720°С. Тому при повільному охолодженні в цьому інтервалі температур або довготривалій ізотермічній витримці при 720°С проходить друга стадія графітизації. При цьому можливе перетворення аустеніту в перлит із наступним

перетворенням його цементиту на ферит і графіт або безпосереднє перетворення аустеніту на ферито-графітну суміш. В залежності від повноти графітизації на другій стадії внаслідок відпалення одержують перліто-феритні або феритні чавуни. Якщо у відливках не відбувається друга стадія - отримують перлітні ковкі чавуни.

З ковких чавунів виготовляють деталі машин, на які діють вібраційні, знакозмінні та ударні навантаження: картери задніх мостів автомобілів, картери редукторів, гаки, штампи холодного деформування тощо. Маркуються ковкі чавуни літерами КЧ та двома числами, з яких перше - нижнє значення границі міцності при розтягуванні (кгс/мм²), а друге - відносне видовження (%), наприклад, КЧ 35-10.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Накреслити діаграму *Fe-C* (на сторінку); описати властивості графіту, вплив його форми та розмірів на властивості чавунів; маркування та призначення чавунів; класифікацію чавунів за структурою металевої основи; графітизаційне відпалення (графік) білих чавунів на ковкі; мета модифікування чавунів.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. Завдяки яким властивостям чавун знаходить широке застосування як конструкційний матеріал ?
2. Як класифікують чавуни в залежності від форми графіту та структури металевої основи ? Їх вплив на властивості чавуну.
3. Властивості білих чавунів, їх призначення. Згідно з якою діаграмою стану кристалізуються білі чавуни ?
4. Фактори, що впливають на структуру металевої основи чавуну?
5. Згідно з якою діаграмою стану кристалізується сірий чавун ?
6. Як одержати високоміцний та ковкий чавун ?
7. Що таке модифікування чавунів ? Назвіть модифікатори I та II роду.
8. Які фазові перетворення відбуваються на першій та другій стадіях графітизаційного відпалення ?
9. Як маркуються та для яких деталей застосовуються сірі, високоміцні та ковкі чавуни ?

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Робота виконується на зразках доевтектичного, евтектичного та заевтектичного білих чавунів та чавунів: СЧ 15, ВЧ 600 - 3, КЧ 35-10, КЧ 30-6, КЧ 40-3. Для визначення твердості використовується прилад ТК-2, для дослідження структури – оптичні мікроскопи МІМ-5 та МІМ-7.

Вказівки з техніки безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Провести мікроскопічне дослідження шліфів. Порівнюючи мікроструктури зразків із фотографіями структур чавунів, що наведені в альбомах, визначити марку чавуну.

2. Схематично зарисувати структури переглянутих сплавів, вказати структурні складові та, користуючись довідниковими даними, виписати біля кожної структури хімічний склад, твердість та призначення сплаву.

3. На 3...4 зразках чавунів із відомою кількістю перлитної складової, визначити твердість HRB, перевести HRB в HB.

4. За експериментальними даними побудувати та обґрунтувати графік залежності “твердість-кількість перлиту”.

5. За допомогою структурної діаграми визначити необхідний вміст кремнію для одержання феритної, ферито-перлитної чи перлитної структури металевої основи у двох відливках із сірого чавуну товщиною 10 та 100 мм (при вмісті вуглецю 3%).

Таблиця 5.6 – Вплив хімічного складу та швидкості охолодження на структуру сірого чавуну

Товщина відливки, мм	Вміст Si, % (мас.), для отримання структури		
	Ф+Г	Ф+П+Г	П+Г
10			
100			

Зміст звіту

Завдання п. 2, рис. 5.1, графік графітизаційного відпалення, схеми мікроструктур досліджених зразків чавунів, графік залежності “твердість - кількість перлиту”, табл. 5.6, висновки і пояснення.

ДЛЯ ПРИМІТОК