

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Металографія» для студентів спеціальності
G8 «Матеріалознавство» денної та заочної форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Металографія» для студентів спеціальності G8 «Матеріалознавство» денної та заочної форм навчання / Укл.: Ю.І. Кононенко, Г.Г. Трикоз. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 79 с.

Укладачі: Ю.І. Кононенко, ст. викладач
Г.Г. Трикоз, зав. навч. лаб.

Рецензент: О.В. Лисиця, ст. викладач

Відповідальний за випуск: Д.В. Ткач, доц., к.т.н.

Рекомендовано
до видання НМК інженерно-
фізичного факультету
Протокол №1
від 08 вересня 2026 р.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Фізичне матеріалознавство”
Протокол №1
від 26 серпня 2026р.

ЗМІСТ

	с.
Програма дисципліни «металографія»	4
Лабораторна робота №1 Виготовлення металографічних шліфів	5
Лабораторна робота №2 Макроскопічний метод дослідження металевих матеріалів	11
Лабораторна робота №3 Фрактографічний метод дослідження металевих матеріалів	19
Лабораторна робота №4 Мікроскопічний метод дослідження металевих матеріалів	34
Лабораторна робота №5 Кількісний металографічний аналіз структури металевих матеріалів	47
Лабораторна робота №6 Мікроскопічне дослідження залізовуглецевих сплавів (сталей та чавунів)	56
Лабораторна робота №7 Мікроскопічне дослідження кольорових металів та сплавів на їх основі	72
Перелік джерел посилань	78
Додаток А Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт із дисципліни “Металографія” в лабораторіях кафедри фізичного матеріалознавства	79

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «МЕТАЛОГРАФІЯ»

Метою вивчення здобувачами дисципліни «Металографія» є ознайомлення з металографічними методами дослідження металів та їх сплавів; розуміння закономірностей будови структури металів і сплавів; встановлення зв'язку між хімічним складом, структурою, властивостями та застосуванням металевих сплавів.

Завданням вивчення дисципліни є набуття практичних навичок в дослідженні та контролі металевих матеріалів, підготування та вивчення будови структури шліфів за допомогою мікроскопічних методів дослідження.

Дисципліна має переважно дослідницьке та практичне спрямування. Основна увага приділяється експериментальному дослідженню металевих матеріалів із використанням металографічних шліфів, оптичної мікроскопії, методам макро-, мікро- та кількісного аналізу структури.

Основними методами навчання є лабораторні дослідження, спостереження, порівняльний аналіз металографічних зображень, вимірювання структурних параметрів, робота з довідниковою літературою, обробка та інтерпретація експериментальних результатів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ШЛІФІВ

Мета роботи: засвоїти практику виготовлення металографічних шліфів.

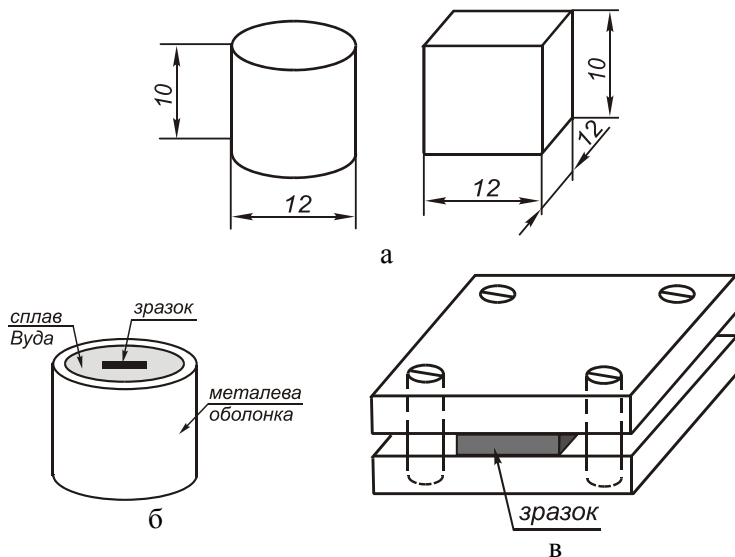
Загальні відомості з теорії

Для мікроскопічного дослідження структури металів необхідна плоска дзеркальна поверхня, що добре відбиває промені світла. Таку поверхню отримують на спеціально виготовлених зразках, які називають мікрошліфами [1, 2, 3].

Зразок для мікрошліфа вибирають з тієї частини виробу або заготовки, яка викликає при дослідженні найбільший інтерес. Зразки вирізають на звичайному металорізальному устаткуванні. Особливо тверді матеріали розрізають за допомогою тонких абразивних кругів. Для вирізання зразків із великих за розміром деталей використовують киснево-ацетиленове різання з подальшим шліфуванням поверхні. В усіх випадках необхідно вживати заходи для запобігання перегрівання поверхні майбутнього шліфа. Застосовують також електромеханічні або електроерозійні методи вирізання зразків.

Форма та розміри шліфів можуть бути різними в залежності від місця вирізання, характеру та мети дослідження (рис. 1.1, а). Якщо зразок має невеликі розміри (дріт, тонкий лист, дрібний різальний інструмент) для виготовлення шліфа його розміщують у спеціальні пристрої або обойми та заливають легкоплавким матеріалом (сплавом Вуда, сіркою), а також протакрилом або пастою АСТ-1 (рис. 1.1, б, в).

Виготовлення мікрошліфа складається з операцій шліфування, полірування та травлення. Первинне вирівнювання поверхні зразка здійснюють на абразивних кругах, уникаючи нагрівання зразка. За цих умов його слід тримати в одному положенні. Потім слід проводити грубе та тонке шліфування на абразивному папері з різним номером зернистості. Під час переходу при шліфуванні від крупнозернистого паперу до більш дрібнозернистого зразок необхідно старанно очистити від пилу для запобігання забруднення дрібнозернистого паперу частинками крупного абразиву. Для цього необхідно змінювати напрямок шліфування на 90° , що значно полегшує та прискорює процес шліфування на наступному номері паперу.



а – шліфи, що вирізані із масивних зразків; б – зразок, що залитий легкоплавким сплавом; в – зразок затиснутий струбциною

Рисунок 1.1 – Виготовлення металографічних шліфів для мікроскопічного дослідження

Зразки шліфують вручну або на верстатах, оснащених диском, на якому закріплюють абразивний папір. Диск обертається із значною швидкістю. При шліфуванні вручну папір розміщують на склі, щоб мати рівну і тверду поверхню.

Під час шліфування тиск на зразок повинен бути достатнім, щоб забезпечити різання абразивом. Проте, надмірний тиск не можна допускати, бо поверхня зразка буде перегріватися, що може привести до зміни структури поверхневого шару.

Найбільш прогресивним при механічному шліфуванні є застосування алмазних паст різної зернистості, які наносять на обертальні круги. При такому шліфуванні поверхня зразка має більш тонкі риси, ніж під час шліфування на абразивному папері.

Після закінчення тонкого шліфування зразок промивають у воді і полірують. Полірування може бути механічним або хімічним.

Механічне полірування проводять за допомогою верстатів із горизонтальними дисками, що обертаються, та на які натягнута тканина (сукно, фетр, велюр). У процесі полірування тканину необхідно змочувати водною полірувальною суспензією, для приготування якої застосовують оксиди хрому, алюмінію, заліза або магнію.

Під час полірування зразок спочатку краще тримати так, щоб напрямок обертання диску був перпендикулярний до напрямку ризок від попередньої шліфувальної операції. Наприкінці полірування рекомендується повільно повертати зразок проти напрямку обертання диску. Це запобігає викришуванню твердих складових та утворенню навколо них “хвостів” на шліфі. Під час обробки на дисках зразок зручніше та безпечніше тримати у тій частині диску, яка рухається від шліфувальника.

Принцип хімічного полірування заснований на вибірковій розчинності виступів на поверхні, яку полірують без накладання електричного струму; полірування здійснюють зануренням зразка у відповідний реактив. Застосування хімічного полірування обмежується, бо важко контролювати якість поверхні.

Ступінь готовності шліфа оцінюють у світловому мікроскопі при збільшенні $\times 100$, поверхня його повинна бути плоскою, невеликий завал краю шліфа можна допустити тільки у тому випадку, якщо край зразка не досліджують. Шліф не повинен мати подряпин та ризок, сторонніх забруднень. Також небажані “хвости”, які іноді утворюються внаслідок викришування включень під час полірування.

На рис. 1.2 зображений стан поверхні мікрошліфа на різних стадіях обробки. Після полірування шліф промивають водою, спиртом і висушують у струмені теплого повітря або за допомогою фільтрувального паперу, який щільно притискають до поверхні зразка без протирання.

Травлення – остаточна операція у підготовці мікрошліфа для дослідження. Під час травлення виявляють мікроструктуру: межі зерен, фази, структурні складові.

Основні способи виявлення мікроструктури: хімічне травлення спеціальними реактивами, електрохімічне – за допомогою реактивів та електричного струму, теплове травлення. Реактиви, технологія і режими травлення для виявлення мікроструктури різних сплавів наведені у спеціальній довідковій літературі.

Для виявлення структури поверхню мікрошліфа занурюють у реактив. Час травлення (5-40 с) залежить від хімічного складу зразка та його структурного стану. Найбільше поширення для вуглецевих, малолегованих і середньолегованих сталей та чавунів мають спиртові розчини азотної кислоти (звичайно 2-5%-ної концентрації).



а



б



в

а – поверхня після грубого шліфування; б – поверхня після тонкого шліфування;
в – поверхня після полірування (помітні неметалеві включення типу Al_2O_3)

Рисунок 1.2 – Послідовність приготування мікрошліфа

Для захисту від механічних пошкоджень, а також від окислення на повітрі готові шліфи зберігають звичайно в ексикаторах (скляних ємкостях з притертою кришкою над шаром речовини, що поглинає вологу, наприклад, прожареного хлористого кальцію). У деяких випадках шліф захищають лаковими плівками або тонким шаром нейтральної мінеральної олії.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Засвоїти послідовність операцій при виготовленні металографічних шліфів та методику травлення.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Який зразок називають мікрошліфом ?
2. Місце вирізки зразка.
3. Які розміри рекомендують для зразка ?
4. Способи виготовлення мікрошліфів під час дослідження зразків малого розміру (дроту, листа).
5. Отримання плоскої поверхні зразка.
6. В чому полягають операції шліфування, полірування та травлення?
7. Які деталі будови металу можна виявити в структурі за допомогою мікрошліфа ?

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Зразки вуглецевої сталі (діаметр 20-25 мм, товщина 10-12 мм). Набір абразивного паперу (№ 63, 40, 28); полірувальний верстат; рідина для полірування – водний розчин оксиду хрому; 4%-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті; фільтрувальний папір.

Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

Порядок виконання роботи

1. Зачистити на абразивному камені поверхню зразка.
2. Провести ручне шліфування на трьох номерах шліфувального паперу (№ 63, 40, 28), який має різну зернистість абразиву.

3. Провести механічне полірування на верстаті “Неріс”, при цьому обов’язково змочувати фетрові круги водним розчином оксиду хрому.

4. Проконтролювати за допомогою мікроскопа структуру мікрошліфа до травлення.

5. Протравити шліф у 4%-ному розчині азотної кислоти та дослідити його під мікроскопом.

6. Порівняти зображення з фотографіями в альбомах, замалювати неметалеві включення і структуру зразків до та після травлення.

Зміст звіту

1. Стисло описати методику виготовлення мікрошліфів.

2. Приготувати мікрошліф. Під час виготовлення контролювати за допомогою мікроскопа та замалювати стан поверхні зразка на окремих етапах.

3. Схематично замалювати та описати структуру виготовлених мікрошліфів до і після травлення. Відзначити наявність дефектів та неметалевих включень.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 МАКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: Вивчити макроскопічний метод аналізу, дослідити характерні види зламів та мікроструктур.

Загальні відомості з теорії

Макроскопічний метод дослідження (макроаналіз) полягає у вивченні будови металу неозброєним оком, а також за допомогою лупи чи бінокулярного мікроскопа при невеликих збільшеннях (до 30-50 разів). Цей метод широко застосовується, є одним з найважливіших засобів вивчення та контролю якості сталі, тому що 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, газові пухирі, усадочні раковини, частинки шлаку; характер руйнування матеріалу; якість та будову зварних з'єднань; характер обробки, що застосована для надання деталі кінцевої форми та властивостей (лиття, обробка тиском, різання).

Макроаналіз проводять на зламах (див. лаб. р. №3) чи на спеціальних макрошліфах, якщо макроструктуру виявляють травленням спеціально підготовленої шліфованої поверхні зразка.

Макроаналіз за допомогою макрошліфа

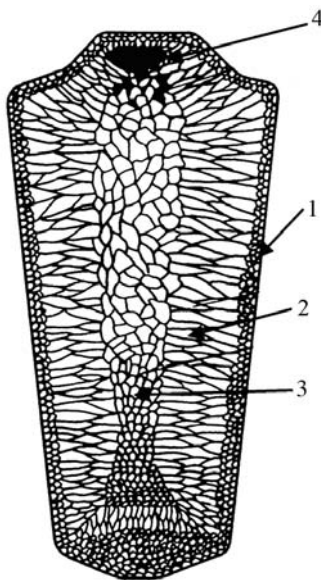
Цей вид аналізу проводять значно частіше, ніж за видом зламу.

Зразок із шліфованою та протравленою спеціальним реактивом поверхнею називають макрошліфом. Шліфування здійснюється так саме, як і при виготовленні мікрошліфа, але зразок може мати більший розмір. Операцію полірування не здійснюють [1, 2, 3].

В залежності від складу сплаву і мети дослідження застосовують різні реактиви і способи травлення (глибоке, поверхневе з підігрівом та без підігріву реактиву, знімання відбитка на папір). Склад реактивів та режими травлення наводяться в довідниках.

Розглянемо деякі види макроаналізу. Будову литої сталі та сталевих зливок вивчають на повздовжніх або поперечних перетинах (темплетах) після глибокого травлення, частіше за все у 50%-них водних розчинах концентрованих кислот: соляної – для вуглецевих та малолегованих сталей, азотної – для середньо- та високолегованих при температурі 60-70°C протягом 15-40 хв. Травлення проводять у витяжній шафі. Макрошліфи виймають із реактиву щипцями.

Будова зливки залежить від чистоти металу, наявності легувальних елементів, температури лиття, швидкості охолодження, конфігурації та теплопровідності виливниці. На рис. 2.1 зображена макроструктура зливки.



1 – дрібнокристалічна кірка; 2 – зона стовпчастих кристалів;
3 – зона рівновісних кристалів; 4 – усадкова раковина

Рисунок 2.1 – Схема будови сталевих зливок

Зона 1 дуже тонка та не завжди розрізняється неозброєним оком. При заливці розтопленого металу в форму поверхневий шар охолоджується з великою швидкістю, внаслідок чого структура шару є

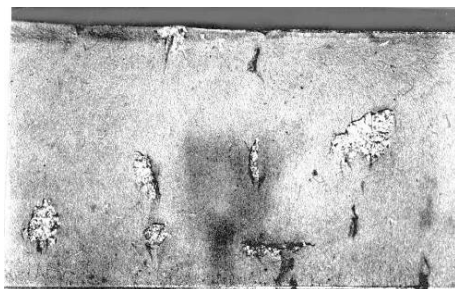
дрібнозернистою. Наступні шари металу охолоджуються уже з меншою швидкістю, при цьому відведення тепла є спрямованим, в першу чергу, перпендикулярно до стінок форми, тому утворюється друга зона 2 подовжених стовпчастих кристалів, що ростуть в напрямку, що зворотній відводу тепла. Зона, що розташована у середній частині зливка, охолоджується ще з меншою швидкістю і найбільш рівномірно у всіх напрямках. Унаслідок цього виникає зона 3 рівновісних кристалів, що мають довільну орієнтацію.

В верхній частині зливка виникає шпарина 4, що називається усадочною раковиною, поява якої зумовлена тепловою усадкою металу при твердінні. Це найбільш забруднена частина металу з великою кількістю мікро- та макрошпарин, пухирів.

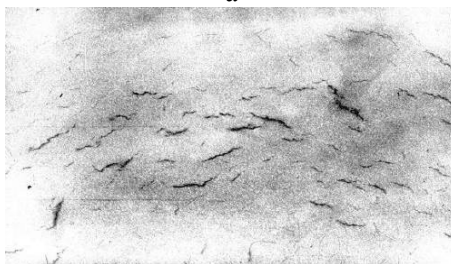
Для виявлення дефектів у металі після гарячої обробки тиском, контроль проводять порівнянням макрошліфа з еталонами державних стандартів. Так визначають деякі види дефектів: центральні шпарини; підкіркові пухирі, що заповнені газами, які не встигли виділитися з рідкого металу під час його кристалізації; міжкристалітні тріщини, які мають зигзагоподібну форму та розташовуються переважно у центрі; ліквіацію домішок, яка спричиняє неоднорідне травлення макрошліфа; флокени – дуже тонкі тріщини овальної або круглої форми розміром від частки міліметра до 100мм у поперечному перерізі, які в зламах мають вид білих дрібних пластівців, схожих на пластівці снігу. На поперечному макрошліфі флокени виявляються у вигляді дрібних тріщин (рис. 2.2, а, б).

Вважають, що частіше за все флокени утворюються при швидкому охолодженні від 200 до 20°C сталі, що утримує водень. При цьому водень, який виділяється із атомарної форми у молекулярну, створює великі внутрішні напруження, що спричиняє утворенню тріщин. Флокени найбільш часто зустрічаються у хромонікелевій сталі.

У процесі гарячої пластичної деформації (кування, штампування) сталь ущільнюється: заварюються внутрішні шпарини, газові пухирі, неокислені тріщини тощо. Зерна витягуються вздовж напрямку деформації, утворюючи направлену волокнисту структуру (рис. 2.3). Волокниста будова металу характеризується значною анізотропією властивостей, тому що в процесі гарячої обробки тиском дендритна структура зливка руйнується і дендрити витягуються у напрямку деформації.



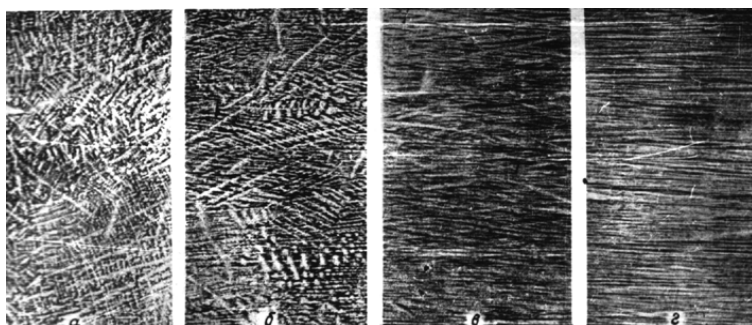
а



б

а – повздовжній злам; б – поперечний макрошліф

Рисунок 2.2 – Флокени



а

б

в

г

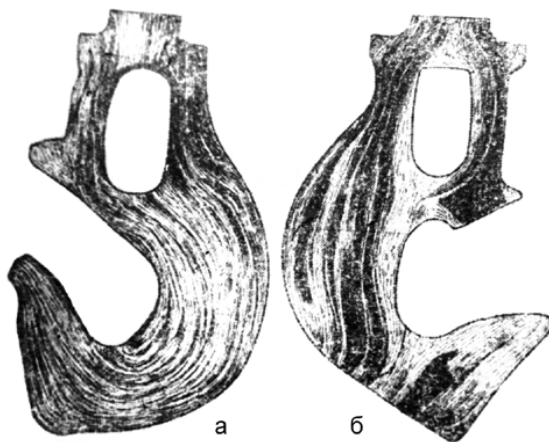
а – 0 %; б – 3 %; в – 6,9 %; г – 14 %

Рисунок 2.3 – Послідовне перетворення дендритної структури зливка у волокнисту структуру зі збільшенням ступеня деформації

Міжвісні 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. Якщо навантаження прикладають уздовж волокна, опір удару та пластичність деталей різко знижується. Це особливо важливо для виробів, які працюють за умов динамічних навантажень при високому рівні напружень (шестірні, колінчасті вали, шатуни, клапани тощо), тому при куванні та гарячому штампуванні намагаються одержати розташування волокна поперек дії навантаження. Сприятливою вважають макроструктуру, коли волокна відтворюють контури деталі (рис. 2.4).

Для виявлення волокнистої будови вуглецевої сталі, яку отримують після гарячої обробки тиском литого металу, застосовують 10%-ний водний розчин азотної кислоти (3-15 хв.). Використовують і інші реактиви в залежності від хімічного складу металу.

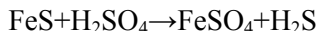
Макроаналіз дозволяє встановити хімічну неоднорідність – ліквацію шкідливих домішок сірки та фосфору в литому та гарячекатаному металі.



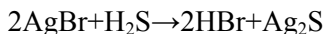
а – правильно проведена деформація; б – неправильно проведена деформація

Рисунок 2.4 – Макроструктура гаку

Розподіл сірки визначають методом відбитка за Бауманом зазвичай на макрошліфах повздовжнього напрямку. Фотографічний (бромсрібний) папір, який змочують на світлі у 5%-ному водному розчині сірчаної кислоти, щільно накладають емульсійною стороною на поверхню зразка та витримують у такому стані протягом 2-5 хв. Сірчані сполуки, які існують у поверхневих ділянках металу, реагують з сірчаною кислотою, яка залишилась на фотопапері:



При цьому утворюється сірководень, який безпосередньо напроти ділянки свого виділення, впливає на кристалики бромистого срібла фотоемульсії:



Темні ділянки сірчаного срібла, які утворюються на фотопапері, визначають форму та характер розподілу сульфідів у досліджуваному металі (рис. 2.5). При рівномірному забарвленні можна вважати розподіл сірки рівномірним. Для зберігання відбиток слід промити водою, зафіксувати у гіпосульфиті, знову промити водою та просушити.

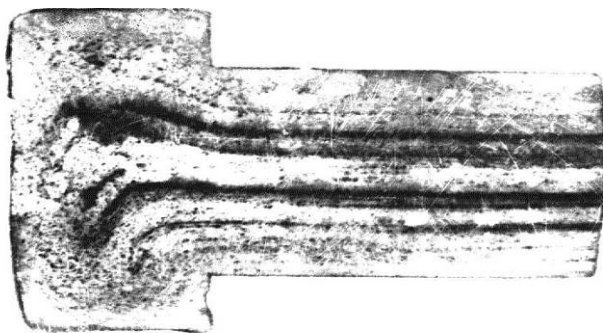


Рисунок 2.5 – Форма та характер розподілу сульфідів

Ліквацію фосфору визначають травленням зразка в реактивах, склад яких визначається складом сталі. Ділянки, що збагачені фосфором, травляться сильніше, що дозволяє виявити ліквацію.

Макроаналіз також є одним із методів дослідження якості зварних з'єднань. Візуальний огляд зварного шва дозволяє виявити відхилення у розмірах та формі зварного шва, наявність газових шпарин, непроварів, тріщин. На макрошліфі, який вирізують поперек шва (іноді додатково і повздовж) після травлення у водному 10-25%-ному розчині азотної кислоти протягом 3-5 хв. виявляють дендритну будову зварного шва, зону термічного впливу, непровари, тріщини, шпарини. Типова макроструктура зварного з'єднання зображена на рис. 2.6.

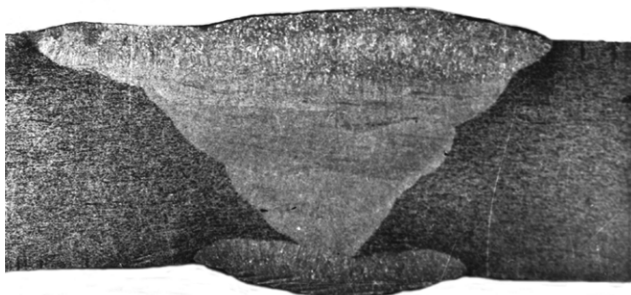


Рисунок 2.6 – Макроструктура якісного зварного з'єднання багатошаровою ручною електродуговою зваркою при Y-подібній підготовці крайок з підваренням кореня шва

Макроаналіз дозволяє також виявити товщину шару після хіміко-термічної обробки, наприклад, цементації. У поперечному перерізі такої сталі після травлення у 4%-ному розчині HNO_3 у спирті спостерігається зона з високим вмістом вуглецю, що має більш темний колір, та порівняно світла серцевина, що відповідає меншому вмісту вуглецю.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Описати призначення макроаналізу, приготування макрошліфів, будову металевго зливку.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Сутність і призначення макроаналізу.
2. Що таке макрошліф? Методика його приготування.
3. Макроструктура литого та гарячедеформованого металів, їх особливості.
4. Як впливає розміщення волокон в деталях після гарячої деформації на механічні властивості ?
5. Макроаналіз зварних з'єднань.
6. Як виявляють ліквіацію домішок ?

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків для проведення макроаналізу; альбоми з фотографіями макроструктур; реактив для виявлення макроструктури (10%-ний водний розчин азотної кислоти в спирті).

Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити будову литого та гарячедеформованого металів, визначити особливості макроструктури.
2. Виявити будову та дефекти зварних зразків після їх травлення у 10%-ному водному розчині азотної кислоти. Шліфовану поверхню зразка опустити в реактив на 2-3 хв. для виявлення макроструктури. Витягнути зразок з реактиву, промити проточною водою, просушити фільтрувальним папером або струменем гарячого повітря.

Зміст звіту

1. Стисло описати призначення макроскопічного аналізу.
2. Стисло описати методику приготування макрошліфа та реактиви, які застосовують для його травлення.
3. Дослідити, замалювати та описати структуру литої і гарячедеформованої сталі.
4. Виявити травленням будову зварного з'єднання. Описати методику травлення, схематично зарисувати та описати досліджені структури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ФРАКТОГРАФІЧНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ

МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: Ознайомитися із фрактографічним методом аналізу матеріалів, дослідити характерні види зламів на зразках та мікрофотографіях.

Загальні відомості з теорії

Фрактографія вивчає механізми утворення та будову зламів, тобто поверхню зразка або деталі, що утворилася при їх руйнуванні в результаті експлуатації або випробування. Фрактографічний метод дозволяє виявити причини та механізм порушення суцільності матеріалу; дозволяє встановити зв'язок будови металу в зламі з умовами дії напружень та процесом руйнування, а також між будовою зламу і металографічною структурою металу. Злам слугує своєрідною фотографією процесу руйнування, структурного стану в локальному об'ємі при проходженні магістральної тріщини, яка визначає руйнування деталей або зразків. Вид зламу – критерій оцінки властивостей матеріалів.

Дослідження зламів неозброєним оком або при невеликих збільшеннях (до 60-120 разів) дозволяє отримати загальну картину процесу руйнування (макрофрактографія). Можливість більш ретельного та повного вивчення рельєфу в межах декількох зерен і субзерен досягається при використанні збільшень до декількох тисяч та десятків тисяч разів (мікрофрактографія) за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ).

Макроскопічна фрактографія

Макроскопічне дослідження зламів є першою та необхідною операцією фрактографічного аналізу. Макроаналіз передбачає як огляд, так і фотографування зламів. Для фрактографічного аналізу використовуються тільки що зруйновані поверхні без механічних пошкоджень, слідів окислення, бруду тощо. При необхідності злами очищують, промиваючи у відповідних розчинниках (наприклад, в етиловому спирті). Після промивання злам просушують в струмені теплого повітря. При вивченні характеру і причин експлуатаційних

руйнувань очищення ведуть лише після ретельного огляду зламу в недоторканому вигляді. Наявність окислів, слідів олії, фарби тощо може надати додаткову інформацію щодо умов виникнення тріщини і розвитку процесу руйнування [3, 5].

Аналіз макрозламу починають з огляду поверхні руйнування неозброєним оком або за допомогою 5-10-кратної лупи. Поступово за допомогою бінокулярного мікроскопа переходять до збільшень в 20-120 разів. Потім фотографують макрозлам (збільшення до 10 разів) і окремі його ділянки ($\times 15-20$). Кут освітлення обирають в залежності від характеру макрорельєфу і необхідності виділити на фотознімку характерну особливість будови зламу.

За структурою (зовнішнім виглядом) злами поділяють на волокнисті, кристалічні або змішані. За характером руйнування – в'язкі, крихкі та втомлені.

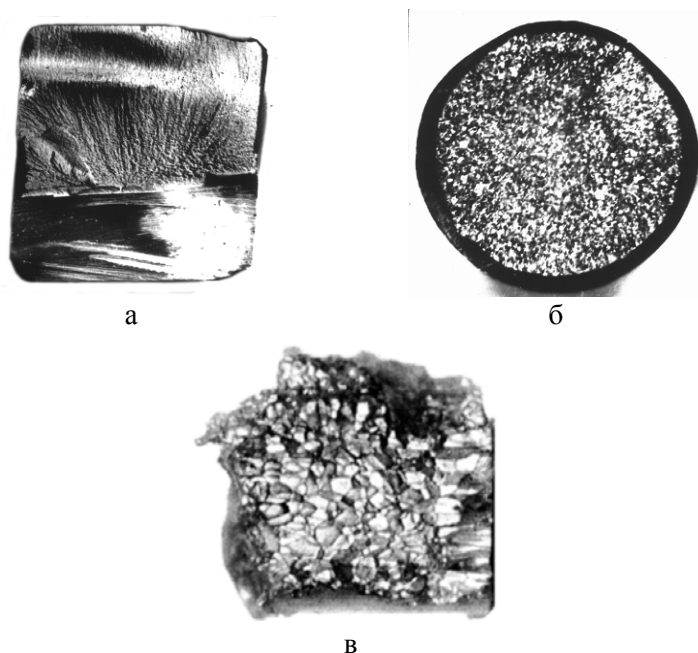
Волокнистий злам (рис. 3.1) характеризується наявністю волокон, які утворюються при пластичній деформації зерен в процесі руйнування (рис. 3.1, а). Він має матову шорстку поверхню у випадку розповсюдження руйнування в площині, яка перпендикулярна напрямку дії максимальних напружень розтягу. Якщо руйнування співпадає із напрямком дії дотичних напружень, волокнистий злам набуває більш блискучого та шовковистого вигляду.

Кристалічний злам – результат крихкого руйнування з малою пластичною деформацією під дією нормальних напружень. Зерна при цьому не деформуються, зберігається їх форма та розмір. Кристалічний злам характеризується наявністю окремих плоских ділянок (фасеток), що дають у сукупності блискучий фон без помітних ознак деформації зразка в місці зламу (рис. 3.1, б). Розрізняють крупнокристалічні та дрібнокристалічні злами в залежності від ступеня дисперсності фасеток.

При оцінюванні зламу потрібно враховувати характер навантажень, що прикладаються (ударні чи статичні), оскільки один і той же матеріал може мати в результаті статичного прикладеного навантаження волокнистий злам, а при ударному навантаженні – кристалічний.

Процес в'язкого та крихкого руйнування відбувається у дві стадії: зародження мікротріщини та її поширення. За механізмом зародження вони принципово не відрізняються. Відмінність пов'язана із швидкістю поширення тріщини, що визначається структурою та

властивостями матеріалу. При крихкому руйнуванні ця швидкість дуже велика і досягає 0,5 від швидкості поширення звуку в матеріалі. У випадку в'язкого руйнування тріщина розповсюджується з малою швидкістю, що визначається швидкістю деформації зразка.



а – в'язкий волокнистий; б – крихкий кристалічний; в – каменеподібний

Рисунок 3.1 – Види зламів

У полікристалах тріщина під час руйнування може розповсюджуватися по тілу зерна, в такому випадку злам називають *внутрішньокристалітним (транскристалітним)*, або вздовж межі зерна, в цьому випадку злам називають *міжкристалітним (інтеркристалітним)*. Міжкристалітний злам завжди крихкий, внутрішньокристалітний спостерігається як при крихкому, так і при в'язкому руйнуванні.

Вид зламу свідчить про характер руйнування, розмір зерна (дрібно- і крупнокристалічний злами). Перегрів сталі можна виявити у

випадку присутності великих блискучих зерен транскристалітного зламу, який називають “нафталіновим” зломом. Сильно перегріта сталь має міжкристалітний каменеподібний злам (рис. 3.1, в). За зломом металу можна виявити наявність дефектів металургійного походження (раковини, пухирі, грубі неметалеві вкраплення), оцінити глибину дифузійного шару після хіміко-термічної обробки.

При проведенні макроаналізу злам оцінюється і класифікується за такими основними ознаками: орієнтація поверхні руйнування; макрогеометрія; ступінь пластичної деформації; шорсткість; колір; блиск.

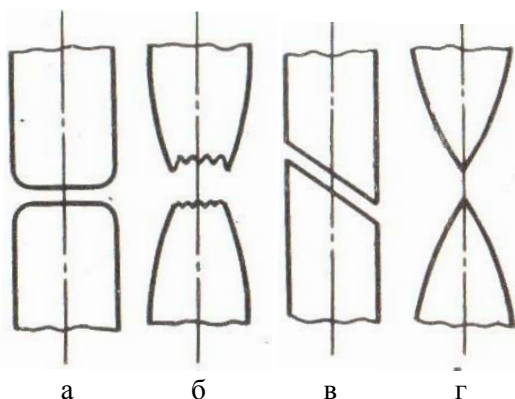
Орієнтація поверхні зламу пов’язана із характером навантаження, напруженого стану, дією нормальних та дотичних напружень, що спричиняють руйнування. За цією ознакою злами класифікують на прямий, косий та прямий зі скосами (чашковий).

Прямим (рис. 3.2, а) називають злам, поверхня якого орієнтована нормально до осі зразка або деталі, тобто перпендикулярно напрямку найбільших зусиль розтягу. Така орієнтація зламу є характерною ознакою макрокрихкого руйнування.

Прямий злам зі скосами (чашковий) (рис. 3.2, б) утворюється при розтягненні гладких циліндричних зразків найчастіше конструкційних легованих сталей і характеризується наявністю поверхні волокнистої будови, яка розташована в середній частині перерізу зразка перпендикулярно напрямку максимальних зусиль розтягу, і бокових скосів, які орієнтовані приблизно під кутом 45^0 до основної поверхні руйнування. Формування «чашки» пов’язано із утворенням шийки, що призводить до виникнення значних бокових і осьових напружень в центрі зразка. Тут починається руйнування, яке спочатку розповсюджується в площині, що орієнтована нормально до осі зразка. В результаті зміни напружено-деформованого стану при наближенні тріщини до поверхні зразка вона змінює свій напрямок в бік максимальних дотичних напружень із утворенням бокових скосів.

Косий злам (рис. 3.2, в), тобто такий, поверхня якого нахилена під кутом до осі зразка чи деталі, утворюється шляхом зрізу в площині максимальних дотичних напружень. Спостерігається найчастіше при руйнуванні анізотропних матеріалів із обмеженою пластичністю і опором руйнуванню зрізом, наприклад, у магнієвих і алюмінієвих деформівних сплавах тощо.

Наявність бокових скосів по краю зламу (чашки), як і косий злам, є ознакою макров'язкого руйнування. Розміри скосів збільшуються зі зростанням зони пластичної деформації, яка супроводжує руйнування. При максимальній реалізації пластичності матеріалу в зоні руйнування при розтягненні можуть утворюватися повністю конічні злами (рис. 3.2, г), що є характерними лише для дуже пластичних матеріалів (свинець, чистий алюміній, електролітична мідь тощо).



а – прямий; б – прямий зі скосами типу «чашка-конус»; в – косий; г – конічний

Рисунок 3.2 – Характерні види макрозламів при розтягненні

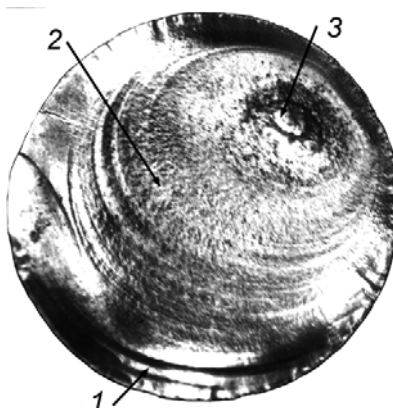
Оцінка макрозламу за геометричними ознаками (макрогеометрія) передбачає розподілення їх на однорідні та неоднорідні, а також злами зірчасті, шевронні та складної форми.

Однорідний злам морфологічно характеризується однаковою поверхнею, що спостерігається дуже рідко, наприклад, при руйнуванні лише деяких крихких матеріалів, вуглецевих сталей в умовах низьких температур.

Для більшості зламів (*неоднорідних*) характерна неоднорідність будови, наявність зон із різним макроорієнтуванням, кристалічністю, шорсткістю, блиском тощо. Неоднорідність будови зламу обумовлена або неоднорідністю самого досліджуваного матеріалу за хімічним складом і властивостями, або особливостями процесу руйнування, які

пов'язані із вихідною неоднорідністю напруженого і деформованого стану.

Неоднорідність макробудови зламів дуже добре спостерігається на типових зламах *втомного* руйнування (рис. 3.3 та 3.4). Розрізняють осередок руйнування, зони розвитку втомного руйнування та доламування. Осередок руйнування уявляє собою відносно невелике місце зародження руйнування (мікроскопічне місце зародження тріщини). Осередки руйнування знаходяться в основному на поверхні деталі (або зразка) в місцях концентрації напружень або різного роду дефектів.



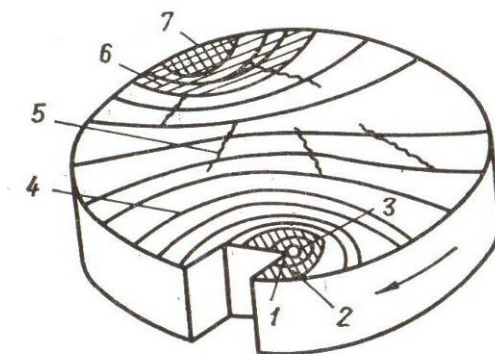
1 – місце зародження тріщини; 2 – зона поступового руйнування;
3 – зона миттєвого зламу (зона доламування)

Рисунок 3.3 – Злам від втоми

В зоні розвитку втомної тріщини розрізняють приосередкову область та область власне втомного руйнування з ділянкою прискореного розвитку тріщини перед кінцевим руйнуванням (доламуванням). Приосередкова область характеризується дрібнозернистою структурою та малою шорсткістю, має блискучий вигляд. Зона втомного руйнування відрізняється дисперсністю будови, гладкою матовою поверхнею із бархатним відтінком. Шорсткість поверхні зменшується при зниженні амплітуди напружень і швидкості розповсюдження магистральної тріщини.

Макроскопічною ознакою втомного зламу є втомні лінії, утворення яких обумовлено зупинкою фронту або зниженням швидкості розповсюдження тріщини. В місцях розташування втомних ліній спостерігається зміцнення металу.

Ділянка втомного розвитку тріщини, яка відображує перехід від зони втомного руйнування до зони доламування, утворює більш шорсткий мікрорельєф зламу, який відповідає зростанню швидкості розповсюдження тріщини. Зона доламування відповідає заключній (швидкій) стадії руйнування, яка пов'язана зі зменшенням перерізу зразка при зростанні тріщини. В крихких матеріалах злам в зоні доламування має в основному кристалічну будову, для в'язких матеріалів характерна волокниста будова. Зона доламування може знаходитися як в середині деталі (рис. 3.3), так і на її поверхні (рис. 3.4).



1 – осередок; 2 – приосередкова зона; 3 – первинні сходишки скидання; 4 – втомні лінії; 5 – вторинні сходишки скидання; 6 – перехідна зона; 7 – зона доламування

Рисунок 3.4 – Макробудова втомного зламу (схема)

Втомний злам може утворитися в деталях, які в процесі обробки витримують тривалі циклічні навантаження (вали, осі, шестерні, шатуни, ресори, пружини). За таких умов експлуатації руйнування може розвиватися при початковому напруженні, яке значно нижче не лише границі міцності, а й границі плинності. Таке явище називають втомою металу, яка полягає в тому, що при багаторазових навантаженнях в місцях з найбільшою концентрацією напружень та з

наявністю дефектів, різких переходів, перетинів, виникають мікротріщини.

Шорсткість (наявність нерівностей) зламу пов'язана із умовами навантаження при руйнуванні, характером розповсюдження тріщини, кристалографічної орієнтації елементів структури, розміром зерен матеріалу, ступенем їх деформації тощо.

Відмінність за кольором є однією з характерних ознак зламів, які пов'язані зі структурою, умовами випробування і, головним чином, легуваністю сталі. Вуглецеві сталі мають сріблястий колір зламу, нікелеві – специфічний світло-жовтий, хромисті – світло-сірий. Марганець надає зламу сталі характерний тусклий, сірий колір. В складнолегованих сталях марганець і нікель мають переважний вплив на колір зламу.

Мікроскопічна фрактографія

Мікрофрактографія надає важливу інформацію щодо особливостей будови зламів в межах окремих зерен і субзерен, щодо мікромеханізму процесу руйнування, його зв'язку з елементами структури і характером силового впливу; дозволяє дослідити руйнування як локальний процес, обумовлений мікронеоднорідністю металу.

Метод світлової фрактографії. Проводиться вивчення зламів за допомогою світлового мікроскопу при незначних збільшеннях. Цей метод використовується лише для попереднього огляду мікрорельєфу поверхні руйнування і вибору ділянок, що мають інтерес для подальшого дослідження.

Метод електронної мікрофрактографії передбачає використання просвічувальних та растрових електронних мікроскопів. Просвічувальний мікроскоп дозволяє вивчати будову зламів непрямим методом при виготовленні копій-відбитків, які називають репліками. Найбільш розповсюдженими є вугільні репліки, товщина яких складає до 20 нм і регулюється тривалістю напилення плівки. Дослідження зламів за допомогою растрового електронного мікроскопу із великою роздільною здатністю і великою глибиною різкості дозволяє отримувати досить точне зображення мікрорельєфу при значних збільшеннях (оптимальними вважають 2000-10000 разів). За допомогою цих мікроскопів вивчають безпосередньо поверхню зламів.

Проведення фрактографічного аналізу на мікрорівні дозволяє класифікувати досліджувані поверхні руйнування і за зв'язком з елементами структури матеріалу і за механізмом руйнування. В першому випадку розрізняють внутрішньозеренний злам, який утворюється в результаті проходження тріщини по тілу зерна, і міжзеренний, коли переважним місцем утворення і розповсюдження тріщини є межі зерен. Поверхні міжсубзеренного руйнування відповідають поверхням меж субзерен. В другому випадку розрізняють крихкий, в'язкий, квазікрихкий і втомний злами.

Основні типи мікрорельєфу зламів при внутрішньозеренному руйнуванні.

Крихкий злам. Крихке руйнування металів супроводжується формуванням в зламі поверхонь внутрішньозеренного сколювання у вигляді плоских фасеток сколювання, які утворюються в результаті руйнування по певним кристалографічним площинам з мінімальною пластичною деформацією. При крихкому руйнуванні полікристалу тріщини сколювання розповсюджується водночас в декількох близько розташованих площинах. Перехід від однієї площини до іншої при з'єднанні двох поверхонь сколювання, що розташовані на різних рівнях, приводе до утворення сходинок.

Система сходинок утворює струмковий візерунок (рис. 3.5).

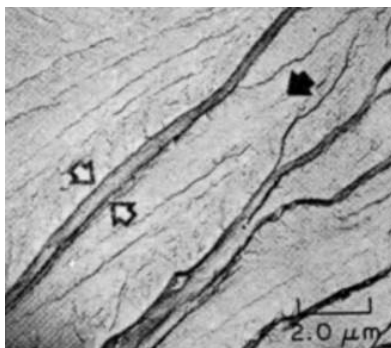


Рисунок 3.5 – Мікрофрактограма крихкого внутрішньозеренного руйнування (струмковий візерунок), $\times 10000$ (РЕМ).

Білими стрілками показано сходинку сколювання, чорною – напрямком розповсюдження тріщини. Сходинки сколювання завжди

об'єднуються в напрямку розповсюдження тріщини. Паралельна орієнтація сходинок на всіх фасетках сколювання вказує на безперервне поширення фронту тріщини.

В'язкий злам. Мікроскопічно в'язке руйнування спостерігається, якщо макропластична деформація в процесі руйнування достатньо велика і відбувається в значному об'ємі. Основним елементом мікрорельєфу в'язкого руйнування є ямки, що уявляють собою мікропоглиблення у вигляді ямок на поверхні зламу, формування яких супроводжується значною пластичною деформацією (рис. 3.6).

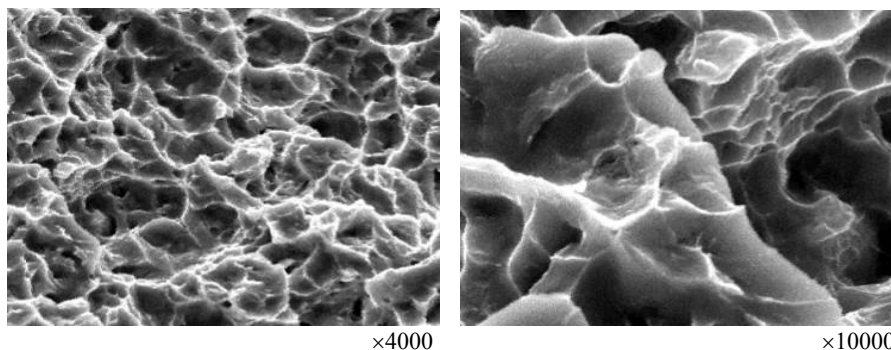


Рисунок 3.6 – Ямковий мікрорельєф в'язкого зламу в растровому електронному мікроскопі

Утворення ямок обумовлено виникненням локальних пор (мікропустот), їх подальшим зростанням у розмірах і злиттям (рис. 3.7).

На дні ямок можуть спостерігатися неметалеві вкраплення і частинки вторинної фази або їх сліди у вигляді поглиблень відповідної форми (рис. 3.8). Присутність таких частинок впливає на рельєф поверхні зламу. Збільшення кількості виділень в матеріалі приводить до зростання кількості центрів зародження мікропустот і зменшення розмірів ямок. Для високоміцних матеріалів характерною є значна кількість невеликих ямок у зламі, для маломіцних – мала кількість крупних ямок. Дрібні, але достатньо глибокі ямки свідчать про сприятливе поєднання високої міцності і в'язких характеристик матеріалу.

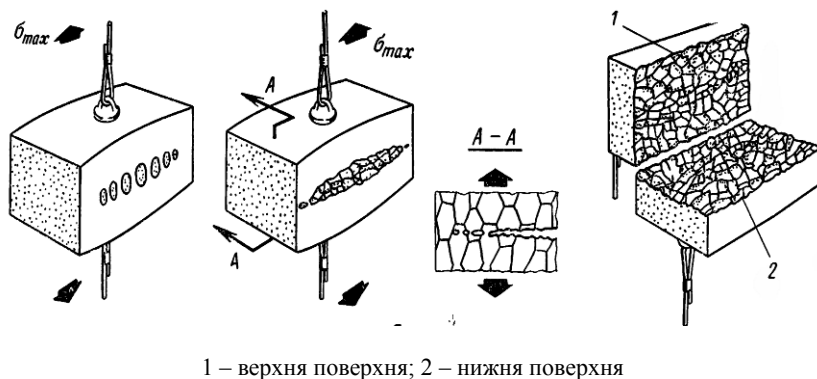


Рисунок 3.7 – Схема утворення рівновісних ямок в умовах одноосового розтягу

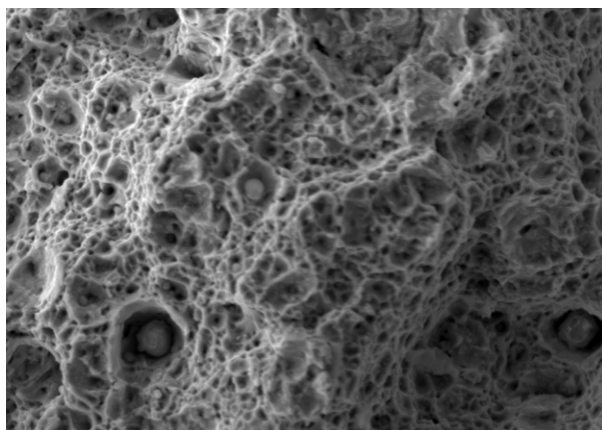


Рисунок 3.8 – Мікрофрактограма ямок із неметалевими вкрапленнями (РЕМ), $\times 800$

В деяких випадках при в'язкому руйнуванні поряд з мікрорельєфом ямкової будови, зустрічаються поверхні гладкого розшарування, які уявляють собою гладкі, безструктурні дещо хвилясті ділянки. Утворення таких поверхонь пов'язано із інтенсивною попередньою пластичною деформацією і більш швидким порівняно із ямковим руйнуванням розповсюдженням тріщини.

Квазікрихий злам. Поверхня руйнування квазісколюванням уявляє собою відносно рівні ділянки, які орієнтаційно не завжди пов'язані із площинами сколювання, що відповідають крихкому руйнуванню. Руйнування квазісколюванням відбувається шляхом об'єднання в єдину поверхню ділянок крихкого руйнування з ділянками деякої пластичної деформації. Це обумовлено злиттям багатьох локальних тріщин, які зазвичай розташовані в різних несприятливо орієнтованих площинах сколювання в окремих зернах. В результаті пластичної деформації і розриву перемичок між тріщинами утворюються елементи мікрорельєфу у вигляді витягнутих високих гребенів і сходинок. Сходинки входять одна в одну на відповідних поверхнях зламу, а гребені, які розділяють ямки, виступають на обох половинах зламу. Особливістю квазісколювання є його дисперсна хаотична будова, яка обумовлена субструктурою, міжфазними межами тощо (рис. 3.9).

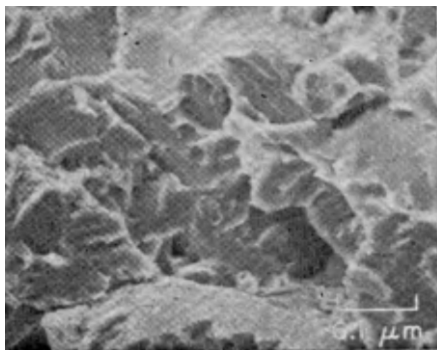
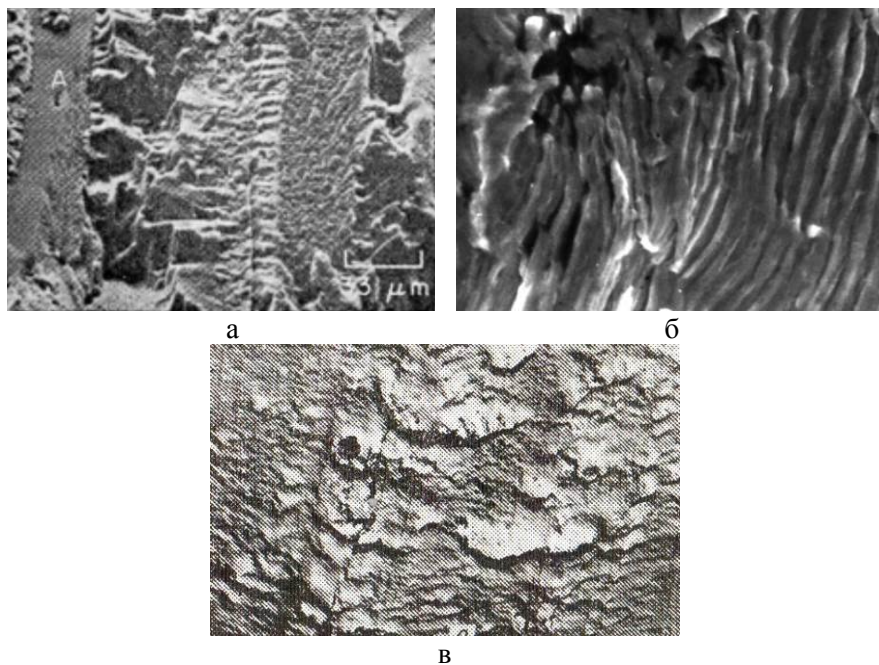


Рисунок 3.9 – Квазіскол в зламі (РЕМ), $\times 1650$

Втомний злам. При дослідженні втомних зламів можуть спостерігатися всі елементи мікрорельєфу крихкого і в'язкого руйнування. До особливостей мікрорельєфу втомного зламу відносять втомні борозенки (крихкі і в'язкі) та тракові сліди (рис. 3.10). Поверхню втомного руйнування досліджують з урахуванням особливостей макробудови втомного зламу, що характеризується наявністю зон втомного розвитку тріщини, перехідної і зони доламування.

Втомні борозенки уявляють собою систему поглиблень та виступів, що чергуються, та орієнтовані перпендикулярно до локального напрямку розвитку тріщини, і є слідами її переміщення за кожний цикл навантаження. Втомні борозенки не виявляються в усій зоні втомного руйнування, а чергуються із ділянками основного мікрорельєфу.

Тракові сліди утворюються при дотиканні протилежних поверхонь руйнування як результат впливу твердих складових або частинок вкраплень на поверхні зламу, які стикаються. Тракові сліди розташовуються в напрямку, який співпадає із напрямком розповсюдження тріщини.



а – крихкі втомні борозенки; б – в'язкі втомні борозенки; в – траковий слід

Рисунок 3.10 – Мікрофрактограми втомного руйнування (РЕМ)

Дуже часто в структурі втомних мікрозламів спостерігаються рівні ділянки без будь-якого характерного рельєфу, утворення яких

пов'язують із руйнуванням шляхом відриву в площинах ковзання, які послаблені дією змінних напружень.

Особливості мікрорельєфу зламів при міжзеренному руйнуванні.

Міжзеренне руйнування, тобто руйнування по межах зерен полікристалу, спостерігається найчастіше за все при знижених або підвищених температурах, водневій та відпускній крихкості, корозії або втомі; воно має низьку енергоємність руйнування. Визначальною умовою утворення міжзеренного зламу є низький рівень сил зв'язку по межах зерен, обумовлений виділенням по ним крихкої фази у вигляді плівки або вкраплень, сегрегацією легувальних елементів тощо. Утворення міжзеренного зламу можливе реалізацією як крихкого, так і в'язкого мікромеханізмів.

При крихкому міжзеренному руйнуванні спостерігаються гладкі ділянки сколу, часто із частинками окрихчуючих вкраплень (нітридів, карбонітридів, карбідів, сульфідів тощо). Із збільшенням розмірів частинок і відносної площі, яку вони займають, мікрорельєф зламу характеризує крихке руйнування (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Мікрофрактограма міжзеренного крихкого руйнування (РЕМ), $\times 1060$

Використання фрактографії дозволяє визначити характер і мікромеханізм руйнування, встановити місцевий напрямок розвитку руйнування шляхом відриву і початкову точку руйнування, дослідити вплив дефектів структури і фаз, що виділилися, на розповсюдження руйнування та оцінити якість матеріалів.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Описати призначення фрактографії, сутність макроскопічного та мікроскопічного фрактографічних методів дослідження.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Призначення фрактографічного методу дослідження.
2. Сутність макроскопічної фрактографії.
3. Види зламів. Особливості будови волокнистого та кристалічного зламів.
4. Класифікація зламів за орієнтацією поверхні руйнування.
5. Класифікація макрозламу за геометричними ознаками (макрогеометрія).
6. Особливості будови і утворення зламів від втоми.
7. Сутність мікроскопічної фрактографії.
8. Основні типи мікрорельєфу зламів при внутрішньозеренному та міжзеренному руйнуванні.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків для проведення макрофрактографічного аналізу; альбоми з мікрофрактограмами.

Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити та охарактеризувати злами зразків, пояснити характер руйнування за видом зламу.
2. Розглянути мікрофрактограми зламів. Визначити характер руйнування металевго матеріалу.

Зміст звіту

1. Стисло описати призначення фрактографічного методу дослідження, сутність макроскопічної та мікроскопічної фрактографії.
2. Дослідити, замалювати та описати макроструктуру зламів.
3. Дослідити та описати розглянуті мікрофрактограми зламів. Визначити характер руйнування металевго матеріалу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 МІКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: вивчити метод мікроскопічного аналізу, ознайомитися з будовою та принципом роботи металографічних мікроскопів МИМ-7, МИМ-8.

Призначення мікроаналізу і формування зображення у мікроскопі

Мікроскопічний метод дослідження застосовують для вивчення мікроструктури за допомогою світлового мікроскопа при збільшеннях до 50-1500 разів (при дослідженні за допомогою електронного мікроскопа до 500 тис. та більш разів).

Мікроаналіз дозволяє визначити структуру металів та сплавів у цілому: форму та розмір кристалічних зерен; зміни структури після гарячої та холодної деформації; термічної та хіміко-термічної обробки; мікрodefekти металу: тріщини, шпарини, раковини; неметалеві вкраплення: сульфідів, оксидів, нітридів, алюмінатів, карбідів, графіт (в чавунах) тощо. За допомогою мікроскопа можна зафіксувати структуру на фотопластинку або на комп'ютер.

Формування зображення у мікроскопі. Дослідження структури у світловому мікроскопі проводиться у віддзеркалених променях (звичайно використовується біле, інколи – ультрафіолетове або інфрачервоне випромінювання). Тому чіткість зображення визначається по-перш за все властивостями світла та оптичними властивостями досліджених зразків [1, 2, 3].

Як правило, полірований зразок без травлення спочатку розглядають при невеликих збільшеннях ($\times 100$). При цьому можна виявити неметалеві вкраплення та мікрodefekти, структура металу не виявляється. Неметалеві вкраплення мають відмінний від металеві основи коефіцієнт віддзеркалення, тому на світлому фоні шліфа вони виділяються темними ділянками (сірого, чорного, синього, жовтуватого кольору) різної форми.

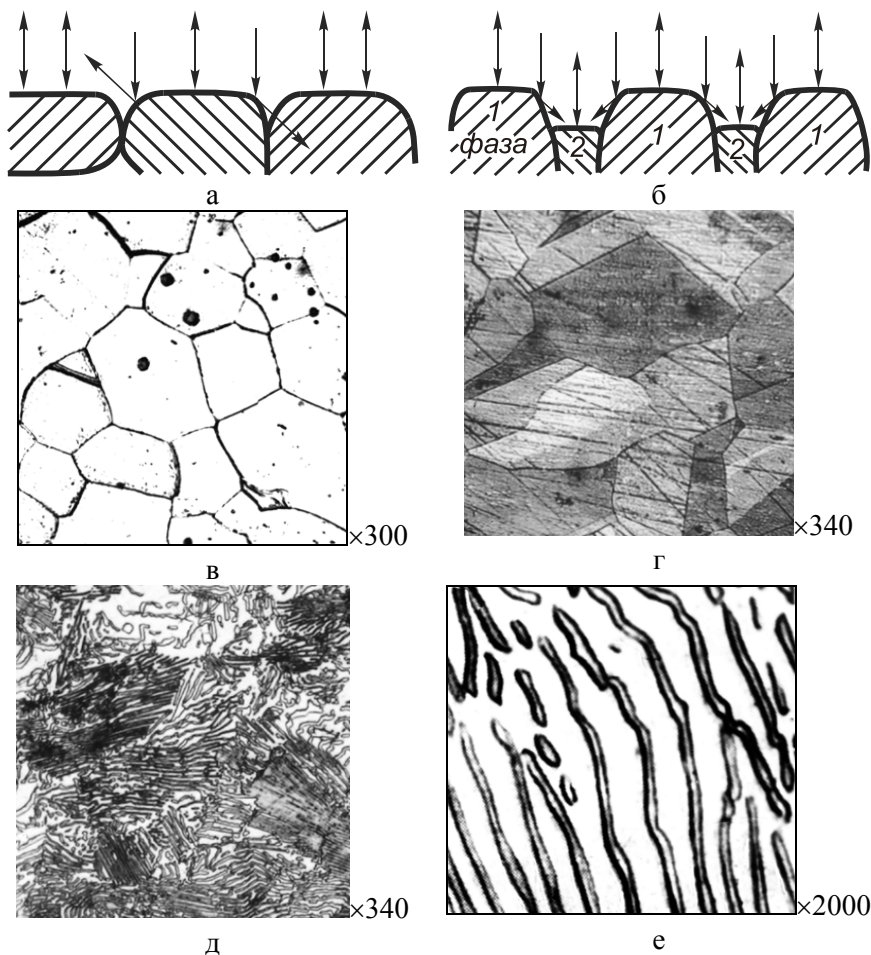
Для виявлення структури поверхню мікрошліфа травлять у розчинах кислот, солей, лугів в залежності від хімічного складу сплаву з подальшим протиранням ватним тампоном (при появі

небажаного осаду), іноді при травленні необхідно провести підполірування зразка. Також застосовують електролітичне або теплове травлення. Склади розчинів та режими травлення визначають у довідниковій літературі. Наприклад, для травлення вуглецевих, малолегованих сталей та чавунів застосовують 2-4 %-ний розчин азотної кислоти у етиловому спирті, протягом 5-40 сек.

При хімічному травленні межі зерен, фаз та структурних складових травляться по-різному, тому на поверхні утворюється мікрорельєф у вигляді впадин та виступів. Канавки на межах зерен більше розсіюють промені, тому межі виглядають як темні лінії (рис. 4.1).

У структурі чистих металів або однофазних твердих розчинів після травлення темні лінії меж виявляють розміри зерен (рис. 4.1, а, в, г). Іноді, незважаючи на однофазність будови, спостерігається селективне (вибіркове) фарбування окремих зерен: поряд з світлими існують більш темні. Це можна пояснити тим, що близько до поверхні мікрошліфа зерна зрізані по різним кристалографічним площинам, які травляться неоднаково (внаслідок анізотропії). Зерна після травлення мають різну шорсткість, а отже різну здатність до відбиття променів (рис. 4.1, г).

При наявності у структурі двох або більше фаз метою травлення є найбільш повне виявлення меж зерен між різними за природою фазами та вибіркове виявлення зерен однієї фази. Окремі фази розчиняються з різною швидкістю: одна структурна складова розчиняється у реактиві швидше, друга – повільніше. Це призводить до виникнення рельєфу, який складається із фаз, які виступають (рис. 4.1, б); при цьому відбивальна здатність шліфа змінюється. Завдяки цьому можна розглянути контури структурних складових. При використанні косого освітлення контури чітко розрізняються завдяки світлим та затемненим ділянкам зразка (фериту і цементиту), ферит (фаза 2) розчиняється швидше цементиту в структурі перліту. Цементит (фаза 1) виступає і відбиває більше променів і в полі зору мікроскопа буде світлою складовою; друга фаза (ферит) навпаки, через більше розсіювання променів, буде виглядати темною. Внаслідок цього структура перліту має вигляд темних та світлих смуг (рис. 4.1, д, е).



а – межі зерен однофазної структури; б – двофазна структура перліту;
в, г – однофазний твердий розчин; д, е – пластинчастий перліт, травлення
4 %-ним спиртовим розчином азотної кислоти

Рисунок 4.1 – Схема, що пояснює формування зображення
при мікроскопічному дослідженні шліфів

Теплове травлення ґрунтується на утворенні оксидних та інших плівок на структурних складових при нагріванні полірованого шліфа.

Плівки характеризуються певною щільністю, товщиною та кольорами мінливості, які залежать від хімічного складу, температури, тривалості нагрівання та орієнтації кристала, це дає змогу використовувати теплове травлення для виявлення структури та визначення природи фаз.

Роздільна здатність світлової оптики

Мікроскоп – оптичний прилад для одержання збільшених зображень об'єктів, які не можна бачити неозброєним оком.

Важливою характеристикою мікроскопу є його роздільна здатність $\left(r = \frac{1}{d}\right)$, яка визначається величиною, зворотною найменшій відстані d , на якій можуть розрізнятися два сусідні елементи структури. Чим менше d , тим вище роздільна здатність r , і, відповідно, більше корисне збільшення мікроскопа, яке визначають за формулою:

$$M = \frac{D}{d},$$

де D – найменша роздільна відстань для людського ока (0,1-0,2 мм);

d – найменша роздільна відстань для мікроскопа:

$$d = 0,5\lambda / n \cdot \sin \alpha,$$

де λ - довжина хвилі світла (для білого світла $\lambda = 0,40$ - $0,79$ мкм);

n – коефіцієнт заломлення середовища між об'єктивом мікроскопа і шліфом (для повітря $n=1$, для кедрової олії $n=1,5$);

α - половина розкриття вхідного світлового пучка;

$n \cdot \sin \alpha$ - числова апертура об'єктива.

Границя збільшення оптичного мікроскопа (до 1500 разів) визначається довжиною хвилі видимого світла. Для одержання більших збільшень треба зменшити λ , тобто використовувати промені з малою довжиною хвилі, що можна реалізувати в електронному мікроскопі.

Збільшення до 1500 раз називається корисним, подальше збільшення тільки збільшує розміри частинки, а нові деталі в її структурі не виявляються.

Принцип роботи і оптична схема мікроскопа МИМ-7

Металографічний мікроскоп МИМ-7 призначений для візуального спостереження та фотографування металічних шліфів та інших об'єктів у світловому полі при прямому та косому освітленні, у темному полі та у поляризованих променях при певних збільшеннях (табл. 4.1, 4.2).

Таблиця 4.1 – Таблиця збільшень мікроскопа МИМ-7

Об'єктиви	Окуляри			
	7 [×]	7 [×] компенсаційний	10 [×]	15 [×]
При візуальному спостереженні				
9×0,20	63	—	90	135
21×0,40	147	—	210	315
40×0,65	280	—	400	600
95×1,25 (олія імерсійна)	665	—	950	1425
При фотографуванні				
9×0,20	80,6	—	—	187,2
21×0,40	188,2	—	—	436,2
40×0,65	358,4	—	—	—
95×1,25	-	851,2	1310	—

Таблиця 4.2 – Таблиця збільшень мікроскопа МИМ-8

Об'єктиви	Окуляри			
	7 [×]	10 [×]	15 [×]	20 [×]
1	2	3	4	5
При візуальному спостереженні				
F=23,2; A=0,17	(60)	90	130	170
F=13,9; A=0,30	(100)	140	200	300
F=8,2; A=0,37	170	240	360	500
F=6,2; A=0,65	(250)	320	500	(650)
F=2,8; A=1,25	500	720	1080	(1440)
F=2,8; A=1,0	500	720	1080	(1440)

Кінець таблиці 4.2

1	2	3	4	5
При фотографуванні				
F=23,2; A=0,17	(70)	120	160	—
F=13,9; A=0,30	(115)	200	270	—
F=8,2; A=0,37	200	340	450	—
F=6,2; A=0,65	(260)	440	600	—
F=2,8; A=1,25	575	1000	1350	—
F=2,8; A=1,0	575	1000	(1350)	—

Примітки:

1.Збільшення, що позначено у дужках, застосовувати не рекомендують.

2.Об'єкти F=2,8; A=1,0 використовують тільки при роботі у темному полі.

На рис. 4.2 зображена оптична схема мікроскопа МИМ-7. Світлові промені від електричної лампи (1) проходять крізь колектор та світлофільтр (2), відбиваються від дзеркала (3), потрапляють на лінзу (4), потім апертурну діафрагму (5) (для обмеження світлового пучка), лінзу (6), фотозатвор (8), польову діафрагму (9) (для обмеження освітленості поля зору), заломлюються пентапризмою (10), проходять крізь лінзу (11), попадають на відбивальну пластинку (14), що відбиває промені, спрямовуються до об'єктива (13) та на мікрошліф, який встановлений на предметний столик (12). Промені, що відбилися від мікрошліфа, знову проходять через об'єктив (13) та пластинку (14), потім попадають на ахроматичну лінзу (17).

При візуальному спостереженні на шляху проходження променів вводять дзеркало (18), що спрямовує промені до окуляра (16). При фотографуванні дзеркало (18) виводиться при висуванні тубуса разом із окуляром (16), промені спрямовуються до змінного фотоокуляра (20), проходять крізь нього, відбиваються від дзеркала (21) і дають зображення на матовому склі (19). При фотографуванні мікроструктури матове скло (19) замінюється касетою із фотопластинкою.

При дослідженні мікрошліфа у темному полі замість лінзи (11) встановлюється лінза (22). Центральна частина цієї лінзи – диск, який затримує центральну частину світлового пучка та пропускає крайові промені, які проходять через прозоре кільце лінзи (22) та потрапляють на дзеркало (24) у вигляді світлового кільця. Для того щоб світлові промені не попадали на пластинку (14), виводять діафрагму (23).

Промені, що відбилися від дзеркала (24), потрапляють на внутрішню поверхню параболічного дзеркала (25), відбиваються від нього та концентруються на мікрошліфі (12).

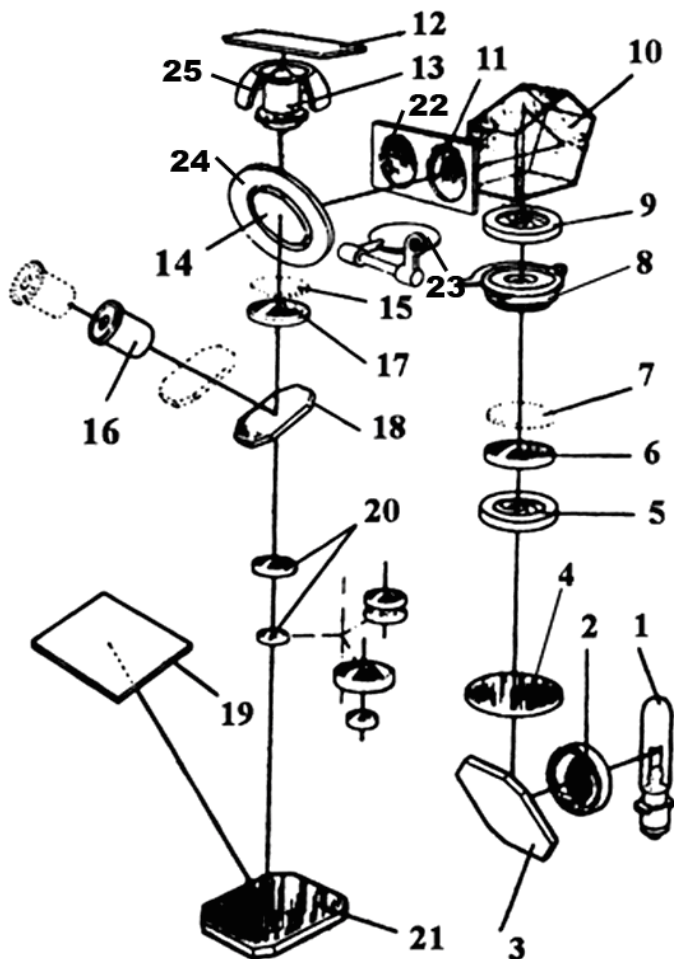


Рисунок 4.2 – Оптична схема мікроскопа МИМ-7

Для роботи в поляризованому світлі в систему вводять два поляризаційних фільтри – поляризатор (7) та аналізатор (15).

Основні системи мікроскопа

Мікроскоп складається із освітлювальної, оптичної та механічної систем, а також апаратури для фотографування.

Освітлювальна система складається із джерела світла, конденсора, світлофільтрів та діафрагм. Як джерело світла (1) (рис. 4.3) використовується кінопроекційна лампа (17В, 170Вт), яка живиться електроенергією від мережі змінного струму через знижувальний трансформатор. Центрувальні гвинти (2) призначені для збігу центру лампи з оптичною віссю колектора. Світлофільтри (кольорові, матові скляні пластинки), що розташовані на диску (3), та призначені для виділення променів певного кольору. При візуальному спостереженні рекомендується застосовувати жовто-зелені фільтри, що враховують чутливість людського ока. Крім того, фільтри такого кольору виправляють хроматичну аберацію та виділяють промені з меншою довжиною хвилі, яка підвищує роздільну здатність мікроскопа.

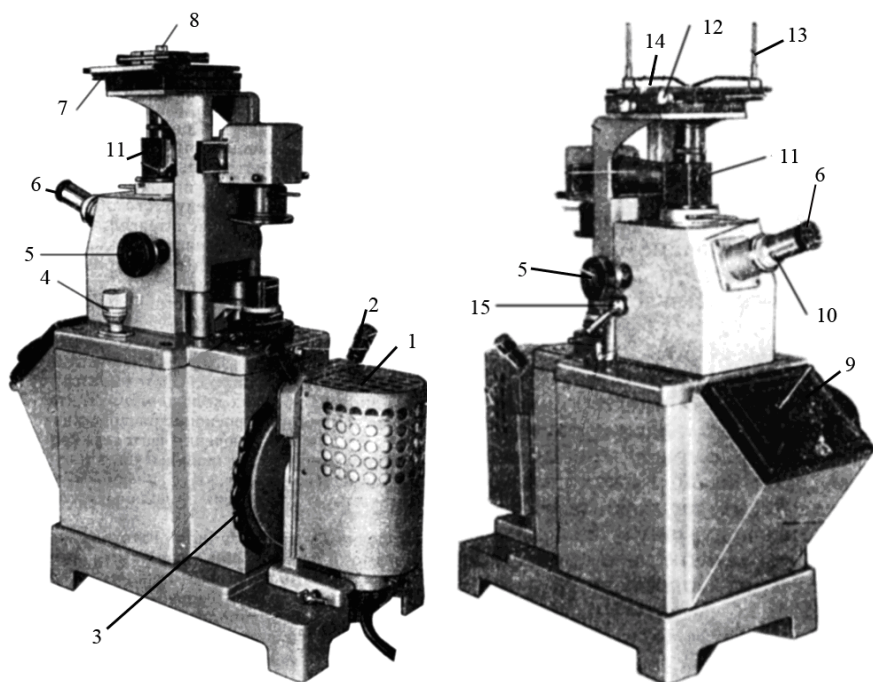


Рисунок 4.3 – Загальний вигляд мікроскопа МИМ-7

Один із способів збільшення контрастності зображення – зменшення кількості розсіяного світла, що виникає від різних деталей мікроскопа. Для усунення шкідливого розсіювання світла необхідно правильне центрування польової та помірне зменшення апертурної діафрагм (9) та (5) рис. 4.2). Апертурна діафрагма обмежує пучок світлових променів, її діаметр змінюється за допомогою кільця з накаткою. Польова діафрагма обмежує розмір поля зору, вона центрується обертанням гвинтів, що знаходяться у нижній частині кожуха. Ступінь розкриття діафрагми змінюється при зміні об'єктива або окуляра.

Оптична система включає об'єктив, окуляр, ряд дзеркал та призм. Об'єктив дає дійсне перевернуте та збільшене зображення об'єкту. Окуляр створює додаткове збільшення уявного зображення звичайно на відстані найкращого зору (250 мм). Робоче збільшення мікроскопа залежить від лінз об'єктива та окуляра і дорівнює добутку їх збільшень (див. табл. 4.1 і 4.2):

$$V = V_{OB} \cdot V_{OK} = \frac{250}{F_{OK}} \cdot \frac{L}{F_{OB}},$$

де L – оптична довжина тубуса мікроскопа;

250 – відстань найкращого зору, мм;

F_{OK} та F_{OB} – фокусна відстань, відповідно для окуляра та об'єктива.

Основне збільшення забезпечується об'єктивом і може досягати 100, збільшення окулярів не перевищує $20\times$. Збільшення окулярів та об'єктивів показано на їх металевій оправі та у таблицях, що приводять в інструкції до мікроскопів.

Об'єктив є системою лінз, що розміщуються в одній оправі та обернені до об'єкту. Визначений підбір лінз у об'єктиві дозволяє усунути оптичні дефекти (сферичну та хроматичну аберації). Сферична аберація приводить до нечіткого зображення за рахунок неоднакового заломлення променів краєм лінзи та її центральною частиною, хроматична аберація полягає у неоднаковому заломленні променів різного кольору при розкладанні пучка білого світла. В залежності від ступеня виправлення (корекції) хроматичної аберації розрізняють об'єктиви – апохромати (для великих збільшень та при фотографуванні) і ахромати (для малих і середніх збільшень).

Окуляр – система лінз, що розміщена в одній оправі та направлена до ока дослідника. Окуляри збільшують зображення, яке одержують об'єктивом та виправляють оптичні дефекти. Для фотографування мікроструктури застосовують фотоокуляри. За видом та ступенем корекції розрізняють наступні основні типи окулярів: прості (окуляри Гюйгенса), компенсаційні та проекційні (гомалі). Прості окуляри із збільшенням 4, 7, 10 та 15[×] частіше використовують для візуальної роботи з ахроматичними об'єктивами, тобто для невеликих збільшень; компенсаційні окуляри з складним оптичним улаштуванням (15, 20[×]) використовують з ахроматичними об'єктивами, тобто для великих збільшень, проекційні окуляри використовують при фотографуванні в сполученні з апохроматами.

Механічна система складається із тубусів та предметного столика. У верхній частині ілюмінаторного (освітлювального) тубуса (11) (див. рис. 4.3) розташовується отвір для об'єктива; на патрубку тубуса існує рамка з лінзами, для роботи у світлому та темному полі і рукоятка для включення діафрагми. У отворі візуального зорового тубусу (10) установлюють окуляр (6). При візуальному спостереженні тубус задвигають до упору, а при фотографуванні він висувається. Предметний столик (7) за допомогою гвинтів (12) може пересуватися у двох взаємно перпендикулярних напрямках. У центрі предметного столика є вікно, куди вставляється одна із підкладок (8) з отворами різного діаметра. Утримувач, який складається з вертикальних колонок (13) та притискачів (14), притискає мікрошліф до підкладки предметного столика. Макрометричний гвинт (5) призначений для переміщення предметного столика у вертикальному напрямку, за допомогою цього гвинта здійснюється грубе наведення на фокус. Затискним гвинтом (15) фіксується положення столика для запобігання його переміщення у вертикальному напрямку. Механізм мікроподачі (тонке фокусування), пов'язаний із системою центрального ілюмінатора, здійснюється за допомогою мікрометричного гвинта (4), який переміщує об'єкт у вертикальному напрямку і точно наводить на фокус.

Розмір мікрометричної подачі 3 мм, ціна поділки барабану – 0,003 мм.

Порядок роботи на мікроскопі при візуальному спостереженні структури

1. Вибрати збільшення мікроскопа (об'єktiv та окуляр) за допомогою табл. 4.1 і 4.2.

2. У отвір візуального (зорового) тубуса вставити окуляр.

3. Відвернути гвинт (15), обертанням макрометричного гвинта (5) підняти предметний столик (7) та вставити об'єktiv у посадочний отвір, що розташовується у верхній частині ілюмінаторного тубуса (11).

4. У вікно предметного столика вставити підкладку (8) із потрібним отвором у залежності від розмірів шліфа.

5. Обертанням макрометричного гвинта (5) опустити предметний столик до збігу риски на кронштейні предметного столика з точкою на корпусі мікроскопа.

6. За допомогою гвинтів (12) установити предметний столик у таку позицію, щоб об'єktiv був у центрі отвору підкладки.

7. Помістити досліджуваний шліф полірованою та протравленою поверхнею униз на підкладку предметного столика понад об'єktivом та притиснути притискачем (14). Шліф обов'язково повинен старанно просушуватися, тому що реактив для травлення або вологість можуть зіпсувати об'єktiv та підкладку предметного столика.

8. Візуальний тубус 6 засунути до упору.

9. Спостерігати в окуляр та обертати макрометричний гвинт 5 до грубого наведення на фокус.

10. Гвинтом (15) закріпити предметний столик у необхідне положення.

11. Спостерігати та обертати мікрометричний гвинт (4) до точного наведення на чітке зображення структури.

12. За допомогою гвинтів (12) переміщувати предметний столик та переглядати структуру у різних місцях шліфа. Пересувати шліф по підкладці предметного столика не можна.

Під час роботи з імерсійним об'єktivом на фронтальну лінзу об'єктива нанести краплю імерсійної олії, обертанням макрометричного гвинта (5) предметний столик опустити до зіткнення мікрошліфа з імерсійною олією на фронтальній лінзі об'єктива та закріпити гвинтом (15); точне наведення на фокус здійснити

обертанням мікрометричного гвинта (4); після роботи олію з об'єктива та мікрошліфа зняти ватою та промити їх бензином.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Приділити увагу вивченню мікроаналізу та методики дослідження мікрошліфів за допомогою світлового мікроскопа при різних збільшеннях.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Мета та призначення мікроаналізу.
2. Що можна виявити на мікрошліфі без травлення?
3. Сутність виявлення мікроструктури при травленні.
4. Які деталі будови металу можна виявити на мікрошліфах після травлення?
5. Будова металографічного мікроскопа; призначення основних систем мікроскопа; робота на мікроскопі.
6. Хід променів в оптичному мікроскопі МИМ-7 при візуальному дослідженні зразка та при фотографуванні.
7. Як визначається роздільна здатність мікроскопа, його корисне та практичне робоче збільшення?
8. Роль імерсійного середовища.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків для проведення мікроаналізу; металографічні мікроскопи МИМ-7, МИМ-8; альбоми з фотографіями структур; реактив для травлення шліфів (4 %-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті).

Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію металографічного мікроскопа.
2. Засвоїти прийоми роботи на мікроскопі у світловому полі та визначення робочих збільшень мікроскопа.
3. Вивчити мікрошліфи до травлення.

4. Провести травлення шліфів у 4 %-ному спиртовому розчині азотної кислоти зануренням шліфа на 2-50 с у реактив.
5. Вийняти зразок із реактиву, промити проточною водою, просушити у струмені гарячого повітря або фільтрувальним папером.
6. Дослідити мікрошліфи під мікроскопом після травлення.

Зміст звіту

1. Описати призначення мікроскопічного методу дослідження.
2. Описати основні системи та принцип роботи мікроскопа МИМ-7.
3. Засвоїти прийоми роботи на мікроскопі, для чого дослідити мікрошліфи до та після травлення при різному збільшенні.
4. Дослідити характерні структури, схематично зарисувати та описати результати дослідження.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

КІЛЬКІСНИЙ МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ

СТРУКТУРИ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: Засвоїти застосування допоміжних відлікових і вимірювальних пристроїв при мікроскопічних дослідженнях. Навчитися кількісно оцінювати об'ємний вміст фаз та структурних складових на площі шліфа.

Загальні відомості з теорії

Кількісна оцінка структурних складових або фаз є важливою у дослідженнях та в умовах виробництва, бо дозволяє оцінювати зміни, що відбуваються під дією механічних, термічних або хімічних факторів. Наприклад: ріст зерна під час нагрівання, зміна розміру та форми зерен у процесі рекристалізації, визначення глибини шару після хіміко-термічної обробки, лінійні розміри дефектів, кількість неметалевих вкраплень, масова частка фаз та структурний аналіз.

Статистичні методи обробки експериментальних даних дають змогу виявити важливі кількісні залежності “властивості – структура”, що не можна одержати при якісних оцінках структури.

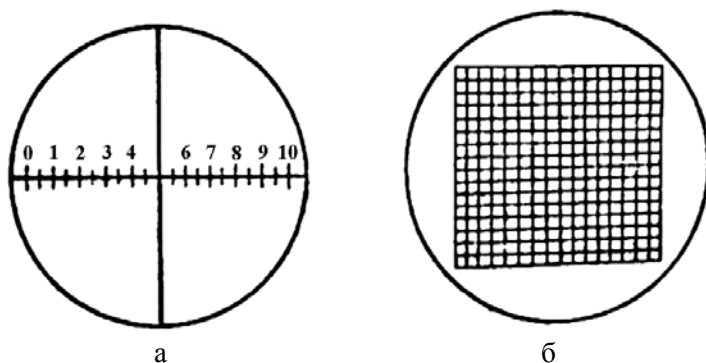
Допоміжні пристрої до мікроскопа

Для кількісного аналізу в даній роботі використовується металографічний мікроскоп МИМ-7, який має ряд пристроїв для відліку та вимірювань. Так для визначення конкретних розмірів використовується окуляр-мікрометр [1, 2, 3]. Це звичайний окуляр (7^х), у який вставлена (між лінзами) кругла тонка скляна пластинка з мікрометричною лінійкою, на яку нанесений 1мм, поділений на 100 частин. Лінійка має 100 позначок (10 великих і по 10 маленьких між двома великими). Крім того, застосовується окуляр-мікрометр з квадратною сіткою, ціна позначки якої становить 0,05 мм (рис. 5.1, а, б).

Для визначення ціни позначки окуляр-мікрометра необхідно сумістити початкові позначки шкал об'єкта-мікрометра і окуляра-мікрометра і підрахувати кількість позначок, що збігаються. Нехай N – кількість позначок окуляра-мікрометра, що збіглися; M – кількість збіжних позначок об'єкта мікрометра. Дійсна довжина позначок

збіжних об'єкта-мікрометра дорівнює 0,01 мм. Тоді ціна позначки окуляра-мікрометра:

$$Z_{ок} = \frac{M \cdot 0,01}{N}.$$



а – лінійка окуляра-мікрометра; б – квадратна сітка

Рисунок 5.1 – Окулярні вкладки

Звичайно, вимірювання роблять при збільшенні $\times 100$. При інших збільшеннях мікроскопа ціна позначки окуляра-мікрометра буде залежати від того, у парі з яким об'єктивом розглядається мікрошліф.

Вимірювання мікроскопічних об'єктів за допомогою окуляра-мікрометра

Для вимірювання лінійного розміру мікроскопічного об'єкта необхідно:

- сфокусувати мікроскоп на даний мікроскопічний об'єкт (наприклад: цементований шар, тріщину, знеуглецьований шар, вкраплені);
- за допомогою гвинтів переміщення предметного столика вивести вимірювальний об'єкт на шкалу окуляра-мікрометра;
- виміряти об'єкт, тобто порахувати скільки позначок шкали окуляра-мікрометра займає об'єкт (рис. 5.1, а);

– визначити величину об'єкта, для чого одержану кількість позначок окуляра-мікрометра помножити на ціну позначки окуляра-мікрометра (0,01 мм).

Визначення величини зерна за стандартною шкалою (ДСТУ 8972:2019)

Важливою характеристикою металів та сплавів, що значно впливає на механічні та інші властивості, є розмір зерна. Сплави, що мають дрібні зерна основної фази, зазвичай мають вищі механічні властивості, особливо пластичність та в'язкість. Кількісний мікроаналіз дає змогу визначити розмір зерен кількома методами. Найпростіший – це метод порівняння зі стандартною шкалою або за допомогою окуляра-мікрометра.

Величину зерна цим методом визначають при збільшенні $\times 100$, порівнюючи зерна зі шкалою, що представлена еталонами у вигляді схематизованої сітки, що умовно позначає розміри зерен (рис. 5.2).

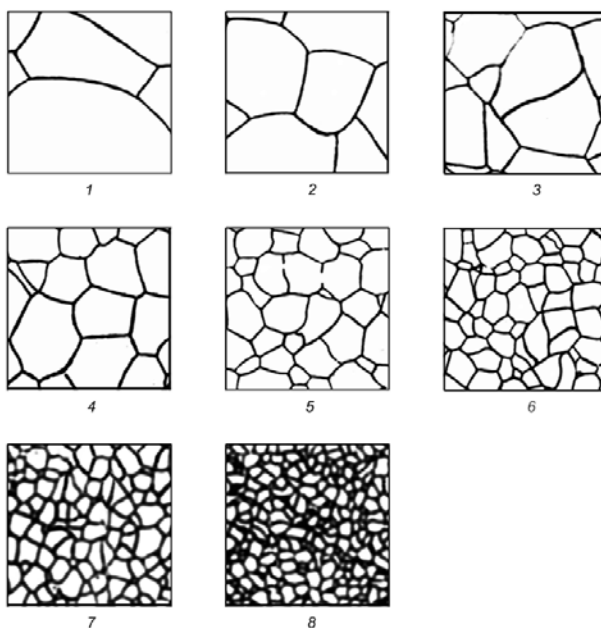


Рисунок 5.2 – Шкала для визначення номеру зерна. Збільшення $\times 100$

Кожен еталон має свій номер зерна. Після перегляду всієї площі досліджуваного зразка вибирають декілька типових місць та порівнюють зі стандартною шкалою і визначають номер зерна. При наявності водночас зерен двох розмірів величину зерна позначають двома номерами, вказуючи (орієнтовно) площу (в процентах), яку займають ті чи інші зерна, наприклад: № 3- 30%, № 6 – 70%.

Визначення величини зерна методом підрахунку зерен на одиниці площі шліфа

Умовний номер можна визначити за кількістю зерен, що розташовані на одиниці площі шліфа (збільшення $\times 100$). В цьому випадку використовують окуляр $7\times$ із сіткою. На ділянці сітки (рис. 5.1, б), площа якої $0,0225\text{мм}^2$ ($0,15\times 0,15\text{мм}$ позначок сітки) підраховують кількість зерен (зерна в середині цієї ділянки рахують як цілі, зерна на межі ділянки, рахуються як 0,5 від цілого зерна, а зерна, що попали у кути ділянки, рахуються як 0,25 від цілого зерна). Потім проводиться перерахування на 1мм^2 і за допомогою таблиці 5.1 (ДСТУ 8972:2019) визначають величину зерна.

Таблиця 5.1 – Робоча таблиця для визначення розмірів зерен

Номер зерна	Площа зерна, мм^2			Кількість зерен на площі 1мм^2			Середня кількість зерен у 1мм^3	Середній діаметр зерен за розрахунком, мм	Середній діаметр зерна, мм
	найменша	середня	найбільша	найменша	середня	найбільша			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-3	0,640	1,024	1,280	0,75	1	1,5	1	1,0	0,875
-2	0,320	0,512	0,640	1,5	2	3	2,7	0,694	0,650
-1	0,160	0,256	0,320	3	4	6	8	0,500	0,444
0	0,080	0,128	0,160	6	8	12	21	0,352	0,313
1	0,04	0,064	0,080	12	16	24	64	0,250	0,222
2	0,020	0,032	0,040	24	32	48	179	0,177	0,167
3	0,010	0,016	0,020	48	64	96	512	0,125	0,111
4	0,005	0,008	0,010	96	128	192	1446	0,088	0,0788
5	0,0025	0,004	0,005	192	256	384	4096	0,060	0,0553
6	0,00125	0,002	0,0025	384	512	768	11417	0,041	0,0391

Кінець таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	0,000625	0,001	0,00125	764	1024	1536	32768	0,031	0,0267
8	0,000312	0,0005	0,000625	1536	2048	3072	92160	0,022	0,0196
9	0,000156	0,00025	0,000312	3072	4096	6144	262144	0,015	0,0138
10	0,000078	0,000125	0,000156	6144	8192	12288	737280	0,012	0,0099
11	0,000039	0,000062	0,000078	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
12	0,000019	0,000031	0,000039	24576	32768	49152	5930808	0,0056	0,0049
13	0,000010	0,000016	0,000020	49152	65536	98304	16777216	0,0039	0,0032
14	0,000005	0,000008	0,000010	98303	131072	196608	47448064	0,0027	0,0023

Примітка. ДСТУ 8972:2019 – Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна

Якщо необхідно визначити номер зерна при використанні інших збільшень, перераховують його, користуючись таблицею 5.2.

Таблиця 5.2 – Перерахунок номера зерна на стандартне збільшення ($\times 100$) при використанні збільшень від 25 до 800

Збільшення 100	Номер зерна (бали)																	
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
25	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	–	–	–	–	–	–	–	–
50	–	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	–	–	–	–	–	–
200	–	–	–	–	–	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	–	–
400	–	–	–	–	–	–	–	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	2	3	4	5	6	7	8

Визначення об'ємної кількості фаз

Методика визначення об'ємної кількості фаз базується на принципі Кавальєрі-Акера: кількість даної фази однакова в об'ємі сплаву, в площині перетину зразка та лінії, що проходить крізь сплав.

Існують декілька методів визначення структурного об'ємного складу сплавів:

- планіметричний (Делеса);
- лінійний (Розівалья);
- точковий (Глаголева).

Планіметричний метод ґрунтується на оцінці площини перерізу частинок в об'ємі. Об'єктом визначення є мікрофотографія. Перерізи

мікрочастинок вирізають та зважують, групуючи за належністю до певної фази. Планіметричний метод має високу точність, але вимагає досить багато часу, тому застосовується, переважно, у випадку визначення фазового складу при малому вмісті фази та великому розмірі частинок. При застосуванні цього методу слід враховувати ймовірність появи похибок у вимірюванні при зважуванні фотовідбитків через можливу неоднорідність за густиною фотопаперу.

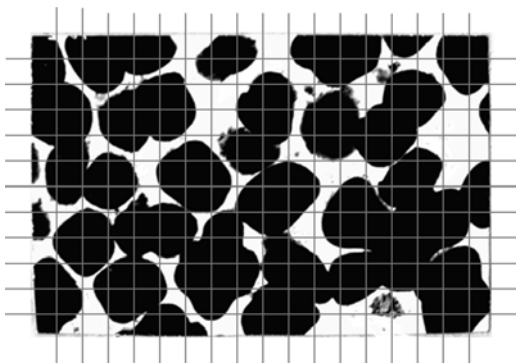
Більш поширеним методом визначення структурного об'ємного складу сплавів є лінійний метод А.Розівалія. Згідно з цим методом, вимірювання об'ємів частинок можна замінити на вимірювання довжини відрізків. Перевагою лінійного методу є більша точність вимірювання, порівняно з планіметричним, виміри є простішими. Лінійний метод полягає в тому, що зафіксована на мікрофотознімку структура, яка складається з будь-якої фази або структурних складових, перетинається прямою лінією або рядом ліній. Контури мікрочастинок окремих фаз на шліфі поділяють ці лінії на відрізки. Якщо підрахувати довжину відрізків, що потрапляють на кожную з фаз структури та поділити отримані значення на загальну довжину проведеної лінії, тоді одержані результати будуть відповідати об'ємній кількості фаз.

Лінії слід проводити довільно, важливо лише, щоб лінії охоплювали всю площину, яка аналізується, і щоб вони були хаотично розподілені на ній. Точність методу залежить від кількості та довжини проведених ліній.

Крім лінійного методу широке застосування має точковий метод визначення об'ємного складу сплавів А.Глаголева. Проілюструємо сутність методу на прикладі. Якщо існує поле, що складається з окремих частин, площі яких нам відомі, рівномірно засіяне відомою кількістю зерен на кожній з цих частин окремо, тоді кількість зерен, що потрапили на будь-яку ділянку рівномірно засіяного поля, пропорційна площі цієї ділянки. Звідки випливає висновок, що при відомій кількості зерен, є можливість визначити площі ділянок. Це положення є основою точкового методу. У випадку кількісного мікроаналізу, точковий метод полягає в підрахунках кількості точок, які співпадають з поділками лінійки (або розрахункової сітки) і належать до певної фази. Якщо поділити кількість таких точок на загальну кількість поділок лінійки (сітки), тоді отримані частки будуть дорівнювати об'єму сплаву, що займає фазу.

При мікроскопічному дослідженні структури з метою визначення об'ємної кількості фаз використовують квадратно-відліковий окуляр або квадратно-розрахункову сітку.

Якщо структура досліджуваного сплаву складається із світлих та темних структурних складових і необхідно визначити їх процентне співвідношення, то завдання можна вирішити точковим методом. Для цього досліджуваний мікрошліф розглядають у мікроскоп не в звичайний окуляр для візуальної оцінки структури, а в окуляр із сіткою. Розрахунки також можна робити на матовому склі, або на фотознімку, використовуючи замість квадратно-відлікового окуляра розрахункову сітку з певною кількістю точок перетину ліній, сума яких приймається за 100% (кількість точок перетину на сітці рис. 5.3 – 187). Наприклад, необхідно визначити співвідношення фазових складових у сплаві, структура якого показана на рис. 5.3.



Темна складова – зміцнювальна γ' -фаза ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$);
світла фаза – матриця нікелевого сплаву (γ -твердий розчин на основі нікелю)

Рисунок 5.3 – Структура жароміцного сплаву на Ni-основі.

На обраному полі мікрошліфа підраховується кількість точок перетину ліній, що потрапили на темну структурну складову, їх 134. Число точок перетину ліній, що потрапили на світлу структурну складову дорівнює $187-134=53$. Тоді об'ємна кількість темної структурної складової (γ' -фази) дорівнює:

$$\varphi_{\gamma'} = (134/187) \cdot 100\% \approx 71,65\%,$$

світлої складової (матриці):

$$\varphi_{\gamma} = (53/187) \cdot 100\% \approx 28,35\%.$$

Для більш точного визначення підрахунок ведеться для 8-10 полів зору, а потім визначається середнє значення φ_{cp} . Результати досліджень заносять у таблицю 5.3.

$$\varphi_{cp} = \frac{\sum \varphi_{темна}}{\sum n},$$

де n – кількість полів зору.

Таблиця 5.3 – Визначення об'ємної кількості фаз

№ поля	Кількість точок перетину		Об'ємна кількість структурних складових, φ , %	
	темних	світлих	γ' -фаза (темна)	γ -фаза (світла)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
Σn			$\Sigma \varphi$ темна	$\Sigma \varphi$ світла

Завдання на підготовку лабораторної роботи

Засвоїти сутність і призначення методів кількісної металографії. Особливу увагу приділити вивченню методики користування допоміжними пристроями до мікроскопа.

Підготувати таблицю 5.3.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Які кількісні характеристики структур можна одержати за допомогою металографічного мікроскопа?

2. Призначення окуляра-мікрометра та об'єкта-мікрометра.
3. Методи визначення величини зерна.
4. Визначення лінійних розмірів об'єктів дослідження.
5. Точковий метод Глаголева, його мета та призначення.

Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків для проведення вимірювання кількісних характеристик мікроструктур; допоміжні пристрої до мікроскопа; альбоми з фотографіями мікроструктур.

Вказівки з техніки безпеки

Загальні вимоги з техніки безпеки виконання лабораторної роботи приведені в додатку А.

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Вивчити будову та призначення допоміжних пристроїв для відліку та вимірювання.
2. Навчитися визначати ціну позначки окуляра-мікрометра при різних збільшеннях мікроскопа.
3. Визначити глибину знеуглецьованого та цементованого шарів.
4. Визначити величину зерна у досліджених зразках за стандартною шкалою та розрахунковим методом.
5. Зробити кількісний розрахунок об'ємної кількості γ' -фази у дослідженому сплаві за мікрофотографіям точковим методом за допомогою спеціальної сітки.

Зміст звіту

1. Описати призначення допоміжних відлікових та вимірювальних пристроїв.
2. Провести кількісний металографічний аналіз щодо визначення величини зерна, глибини знеуглецювання та розміру дифузійного шару після хіміко-термічної обробки.
3. Провести підрахунок об'ємної кількості кожної фази або структурних складових точковим методом Глаголева.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 МІКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ (СТАЛЕЙ ТА ЧАВУНІВ)

Мета роботи: ознайомитися з основними типами мікроструктур залізовуглецевих сплавів у рівноважному стані; навчитися візуально розрізняти сталі та чавуни під мікроскопом.

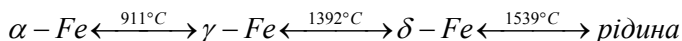
Загальні відомості з теорії

Серед металевих матеріалів в машинобудуванні найбільш широко використовуються сплави заліза з вуглецем – сталі та чавуни. У свою чергу сталі поділяють на вуглецеві та леговані, а чавуни (в залежності від того, в якому стані знаходиться вуглець) – на білі та чавуни з графітом.

Компоненти, фази та структурні складові подвійних залізовуглецевих сплавів. Метастабільна діаграма Fe-Fe₃C

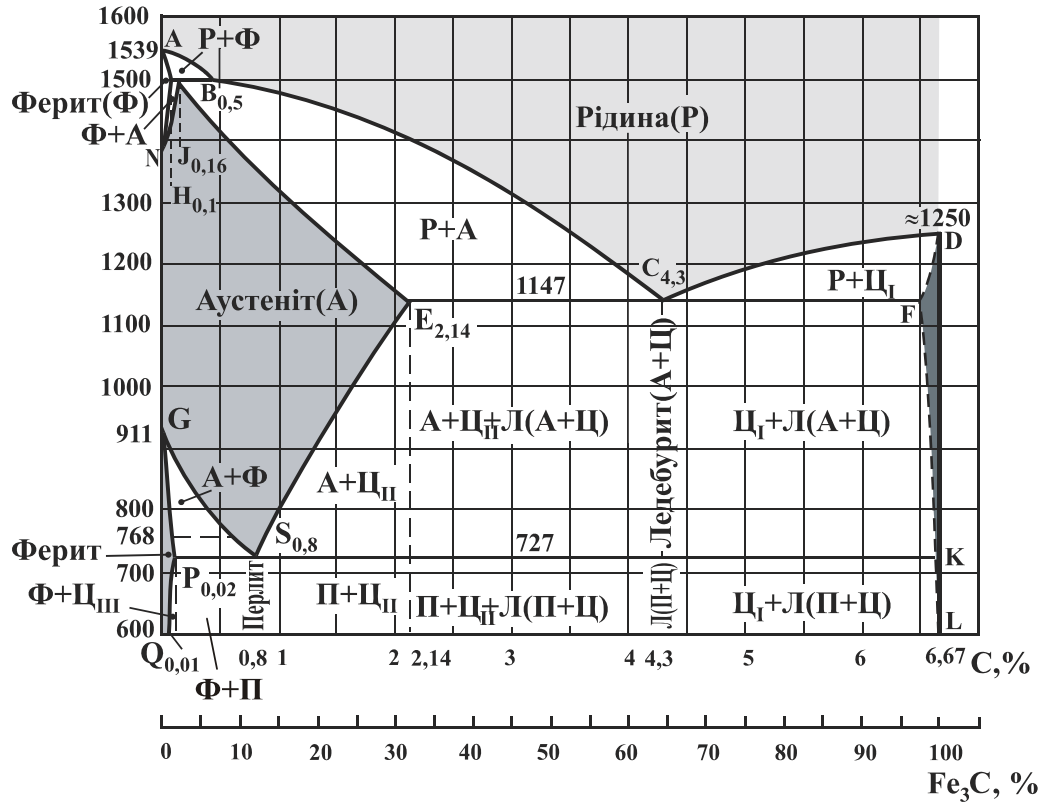
Компоненти – хімічні елементи, що входять до складу сплавів. У випадку системи, що вивчається, компонентами є залізо та вуглець.

Залізо – перехідний метал з температурою плавлення 1539°C, густиною 7870 кг/м³, що має поліморфні перетворення при температурах 911°C (т. G) та 1392°C (т. N), рис.6.1:



Нижче 911°C та в інтервалі 1392-1539°C залізо має ОЦК ґратку; низькотемпературна модифікація позначається $\alpha\text{-Fe}$, а високотемпературна – $\delta\text{-Fe}$. В інтервалі температур 911-1392°C існує $\gamma\text{-Fe}$ з ГЦК ґраткою. Між атомами заліза існує металевий тип зв'язку. Нижче 768°C (точка Кюрі) $\alpha\text{-Fe}$ феромагнітне, а вище – парамагнітне. Залізо має низькі значення міцності, твердості та високу пластичність ($\sigma_B=150\text{-}200\text{МПа}$, $\delta \geq 60\%$, HB 60-70).

Вуглець – неметал з температурою плавлення 3500°C; за звичайних умов має складну гексагональну ґратку – модифікація графіт, за умови високого тиску існує у вигляді алмазу.

Рисунок 6.1 – Метастабільна діаграма Fe-Fe₃C

В системі “залізо-вуглець” є такі фази: рідкий розчин (Р), ферит (Ф), аустеніт (А), цементит (Ц) і графіт (Г).

Ферит – твердий розчин втілення атомів вуглецю в ОЦК гратці заліза. В низькотемпературному α -фериті гранична розчинність вуглецю становить 0,02% при 727°C, а у високотемпературному δ -фериті – 0,1% С при 1499°C. Механічні властивості фериту наближені до властивостей чистого заліза: $\sigma_B=200\ldots250$ МПа, $\delta=40\ldots50\%$, HB=80...100. У мікроструктурі ферит виявляється у вигляді світлих поліедричних зерен.

Аустеніт – твердий розчин втілення вуглецю в ГЦК-гратці γ -Fe з максимальною розчинністю вуглецю 2,14% при 1147°C. Аустеніт – м'яка, парамагнітна фаза, що має такі властивості (наближено): $\sigma_B=450\text{--}800$ МПа, $\delta=50\ldots60\%$, HB=160...200. Мікроструктура аустеніту представлена світлими поліедричними зернами з характерними хаотично розташованими двійниками відпалу (двійниковими межами всередині зерен).

Тверді розчини втілення, крім вуглецю, можуть утворювати азот, кисень, водень, частково бор; тверді розчини заміщення – кремній, хром, нікель і інші метали.

Цементит – хімічна сполука заліза з вуглецем (Fe_3C), містить 6,67% С. Гратка складна ромбічна, характеризується металевим зв'язком між атомами заліза та ковалентним зв'язком між атомами вуглецю та заліза. Тому цементит має високу твердість (HB $\geq$ 800), крихкість і практично нульову пластичність. Цементит є метастабільною фазою. Його температура плавлення становить приблизно 1250°C; до температури 210°C (точка Кюрі) цементит феромагнітний.

Графіт – стабільна модифікація вуглецю із гексагональною складною кристалічною граткою. В шарі зв'язок між атомами реалізується за рахунок ковалентних сил, а між шарами – завдяки слабким силам Ван-дер-Ваальса. Твердість – 3...5HB, він має значну крихкість, пластичність практично відсутня.

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

Ледебурит – евтектична фазова суміш цементиту та аустеніту в інтервалі температур 1147-727°C, перліту і цементиту при

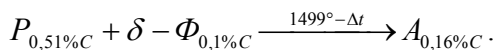
температурах нижче 727°C . Евтектичний сплав з $4,3\% \text{ C}$ має структуру ледебуриту, що містить 64% цементиту (за масою) і 36% фериту, тому ледебурит твердий та крихкий ($\text{HB} \geq 600 \text{ МПа}$, $\delta \approx 0\%$). Утворюється в сплавах ($> 2,14\% \text{ C}$).

Перліт – евтектоїдна фазова суміш фериту та цементиту, що містить $0,8\% \text{ C}$. Властивості перліту залежать від дисперсності ферито-цементитної суміші та форми частинок цементиту. Грубоголочастий перліт має властивості $\sigma_{\text{B}} = 500 \dots 900 \text{ МПа}$, $\delta = 8 \dots 15\%$, $\text{HB} = 160 \dots 250$. Перліт, що утворений більш дисперсною ферито-цементитною сумішшю має більшу міцність та меншу пластичність.

Складність діаграми $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ (рис. 6.1) зумовлена тим, що в залізовуглецевих сплавах, крім первинної кристалізації (рідина – тверда фаза), проходять процеси вторинної кристалізації в твердому стані, які пов'язані з поліморфними перетвореннями заліза та зменшенням розчинності вуглецю у фериті та аустеніті.

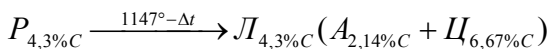
Початок кристалізації всіх сплавів відбувається при температурах лінії ліквідусу ABCD, а кінець – при досягненні температур лінії солідусу AHJECF.

Лінія HJB (1499°C) – лінія рівноваги трьох фаз: P, Ф та А. При деякому переохолодженні нижче цієї температури відбувається утворення аустеніту за перитектичною реакцією, коли внаслідок взаємодії рідини складу точки В з δ -феритом складу точки Н, утворюється аустеніт складу точки J:



Перитектичне перетворення спостерігається у сплавах з вмістом вуглецю $0,1\% < C < 0,51\%$.

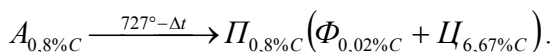
Лінія ECF (1147°C) – лінія евтектичної рівноваги трьох фаз: P, А, Ц. При деякому переохолодженні нижче 1147°C із рідини складу точки С одночасно кристалізується аустеніт та цементит, утворюючи евтектичну фазову суміш, яка називається ледебуритом:



Евтектичне перетворення відбувається у сплавах з вмістом вуглецю $2,14\% < C < 6,67\%$.

Нижче лінії солідус при охолодженні в сплавах відбувається ряд фазових перетворень.

Лінія PSK (727°C) – лінія евтектоїдної рівноваги трьох фаз: А, Ц, Ф. При деякому переохолодженні нижче 727°C , із аустеніту складу точки S одночасно утворюються ферит та цементит. Ця фазова суміш називається перлітом:



Евтектоїдне перетворення спостерігається у сплавах із вмістом вуглецю $0,02\% < C < 6,67\%$.

Отже, в структурі сплавів з $2,14\% < C < 6,67\%$ присутня евтектична складова – ледебурит, який при температурі від 1147°C до евтектоїдної складається із аустеніту та цементиту, а нижче 727°C – із перліту та аустеніту.

Лінії ES і PQ (сольвуси) вказують на зменшення розчинності вуглецю з пониженням температури в аустеніті та фериті відповідно, що приводить до його виділення у вигляді цементиту вторинного (Π_{II}) нижче лінії ES та цементиту третинного (Π_{III}) нижче лінії PQ.

Вміст вуглецю в т. Q при температурі 600°C складає $0,01\%$, а при 20°C – $0,006\%$.

Структурні складові у твердому стані: Ф, А, Ц, П та Л. Фазовий склад залізовуглецевих сплавів: Р, Ф, А та Ц.

В залежності від вмісту вуглецю всі залізовуглецеві сплави поділяють на сталі та чавуни.

Вуглецеві сталі

Сталі – сплави заліза з вуглецем, що містять до $2,14\% C$, а також домішки: корисні (Mn, Si) та шкідливі (P, S, O_2, H_2, N). Від концентрації вуглецю в сталі залежать її структура, властивості та призначення [2, 4].

Класифікація сталей за структурою у рівноважному стані. Діаграма стану $Fe-Fe_3C$ дозволяє визначити структуру в стані рівноваги, тобто після відпалення (дуже повільне охолодження разом із піччю). За структурою сталі поділяють на групи:

– *технічне залізо* – $\leq 0,02\% \text{ C}$. Структура: ферит або ферит з цементитом третинним, який розташовується на межах феритних зерен, його вміст не перевищує $0,3\%$ відносно всієї маси сплаву. Його можна виявити тільки при збільшенні в 400-600 разів. Цементит погано травиться і має блискучий вигляд. Після травлення в 4% -ному розчині HNO_3 ферит і цементит мають світлий колір. Для ідентифікації використовують лужний розчин пікрату натрію, після травлення в якому цементит набуває колір від темно-бурого до чорного, а ферит залишається світлим;

– *доевтектоїдні сталі* – $0,02\% < \text{C} < 0,8\%$. Структура: ферит (світлого кольору) та перліт (темного). З підвищенням вмісту вуглецю кількість фериту в об'ємі сплаву зменшується, а перліту – збільшується. При великій кількості фериту – він розташовується у вигляді масивних виділень, при малій кількості – по межах зерен перліту;

– *евтектоїдна сталь* – $0,8\% \text{ C}$. Структура: перліт. При великому збільшенні (~500 разів) спостерігається пластинчаста будова за рахунок утворення рельєфу на поверхні шліфа внаслідок різного полірування та травлення фериту та цементиту. Пластинки цементиту розташовані вище пластинок фериту і утворюють тінь на площині шліфа. При невеликих збільшеннях перліт має вигляд темної складової.

– *заевтектоїдні сталі* – $0,8\% < \text{C} \leq 2,14\%$. Структура: перліт та цементит вторинний, який розташовується у вигляді світлої сітки, що оточує темнішу перлітну складову.

Властивості сталі визначаються співвідношенням фериту та цементиту, будовою структурних складових.

Класифікація сталей за призначенням. Маркування сталей. В залежності від вмісту вуглецю сталі поділяють на конструкційні та інструментальні.

Конструкційні: $0,02-0,8\% \text{ C}$. Мають структуру ферит та перліт (доевтектоїдні сталі) або перліт (евтектоїдна сталь ($0,8\% \text{ C}$)). Конструкційні сталі поділяються на сталі звичайної якості та якісні.

Сталі звичайної якості (ДСТУ EN 10025-2) широко використовують в будівництві і для слабонавантажених деталей машин та предметів широкого використання. Сталь виготовляють гарячекатаною – сортовою, фасонною, товсто- та тонколистовою і

холоднокатаною. Із цих сталей виготовляють труби, поковки, штамповки, дрiт тощо.

Сталі маркують “Ст” і цифрою (від 0 до 6), що вказує номер марки. Чим більше номер, тим більше кількість вуглецю і тим вище міцність (300...600МПа), але нижче пластичність (22-14 %).

Ступінь розкислення позначається індексами в марці сталі (табл.6.1), наприклад, Ст5пс.

Таблиця 6.1 – Класифікація сталей за розкисленням

<i>Сталь</i>	<i>Індекс в позначенні</i>	<i>Розкислення</i>	<i>Звичайний вміст кремнію, %</i>
Спокійна	сп	<i>Mn+Si+Al</i>	0,14-0,30
Напівспокійна	пс	<i>Mn+Al</i>	0,05-0,10
Кипляча	кп	<i>Mn</i>	<0,05

Сталі звичайної якості містять 0,06-0,49 % С та домішки: 0,25-0,8% *Mn*, 0,05-0,3% *Si*, $S \leq 0,05\%$ та $P < 0,04\%$.

Вуглецеві якісні сталі (ДСТУ 7809:2015) містять значно меншу кількість домішок та неметалевих включень. Вони надходять з гарантованим хімічним складом та механічними властивостями без термічної обробки (гарячекатаними, кованими), після термічної обробки та нагартовки. Маркуються двозначними числами 05, 08, 10, 15,...,80, що вказують середній вміст вуглецю в сотих частках процента. Наприклад, сталь 10 містить 0,1 %С. Індексом маркуються напівспокійні – “пс” та киплячі – “кп” сталі. Спокійні сталі маркуються без індексу. Ці сталі використовують досить широко через відносно невисоку вартість та задовільну технологічність при обробці (пружини, вали, зубчасті колеса тощо).

Автоматні сталі (ДСТУ 8968:2019) – це конструкційні сталі, що добре обробляються різанням внаслідок утворення ламкої стружки. До складу цих сталей вводять сірку (до 0,3%) або свинець (до 0,3%) та селен (0,1%), що сприяють утворенню ламкої стружки, букви С і Е відповідно позначають додаток свинцю та селену. Виготовляють з них кільця, деталі кріплення та інше.

Маркуються: А12 – автоматна сталь, що містить 0,12%С; А35Е – автоматна сталь, що містить 0,35% С, 0,1% Se.

Інструментальні вуглецеві сталі (ДСТУ EN ISO 4957:2007) 0,7...1,3% C – переважно, евтектоїдні або заевтектоїдні сталі. Вони бувають якісними У7, У8,...,У13 та високоякісними У7А, У8А,...,У13А. Буква “У” вказує, що сталь вуглецева інструментальна, а число – середній вміст вуглецю у десятих частках процента, наприклад, У10 – вуглецева інструментальна сталь, що містить 1,0% C, У12А – вуглецева інструментальна високоякісна сталь, що містить 1,2% C. Буква А – високоякісна сталь; має знижений вміст сірки та фосфору. Їх використовують для виготовлення різального інструменту (дрібних мітчиків, свердел), вимірювального (калібрів, скоб) та штампового інструменту для деформування (матриць, пуансонів). Інструмент використовують після термічної обробки.

Леговані сталі

Через те, що значна більшість деталей машин, конструкцій та інструментів повинна мати властивості, які вуглецеві сталі не забезпечують, широко використовують леговані сталі та спеціальні сплави. Особливі властивості таких матеріалів (наприклад, теплостійкість, підвищена міцність, корозійна стійкість, жароміцність, зносостійкість тощо) обумовлені їх хімічним складом, особливим способом виробництва, а також способом обробки.

Спеціальні сталі містять легувальні елементи, які додають до їх складу в певних концентраціях з метою зміни їхньої структури та властивостей. Основні легувальні елементи в сталях: *Mn, Si, Cr, W, Mo, V, Co, Cu, Ti, Zr, Al, B, Nb, Ni*. У деяких сталях легувальними елементами можуть бути також: *P, S, N, Se, Te, Pb, Ce, La, Ta* та інші.

Легувальні елементи розчиняються в основних фазах залізовуглецевих сплавів: фериті, аустеніті, цементиті; утворюють спеціальні карбіди та інтерметаліди.

До елементів, що утворюють карбіди, відносяться: *Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Zr*. Слід зауважити, що здатність до карбідоутворення зростає у наведеному ряді зліва направо (від заліза до цирконію). *Si, Al, Ni, Cu, Co* – належать до елементів, що не утворюють карбіди.

За впливом на температуру поліморфних перетворень легувальні елементи розділяють на дві групи:

- легувальні елементи (*Ni, Mn, Cu, C, N*), що розширюють γ -область – *стабілізатори аустеніту*, при цьому легувальний елемент

підвищує за температурною шкалою точки лінії NJ і знижує точки лінії GS;

- легувальні елементи (*Cr, W, Mo, V, Si, Al, B, Zr, Ti, Nb*), що розширюють α -область – це *феритостабілізатори*. Розширення α -області відбувається внаслідок підвищення точок лінії GS та зниження точок лінії NJ. При цьому спостерігається звуження γ -області.

Марка легованої сталі складається з поєднання букв та чисел, що позначають хімічний елемент та його вміст. Позначення хімічних елементів: *хром – X, нікель – H, марганець – Г, кремній – С, молібден – М, вольфрам – В, ванадій – Ф, титан – Т, кобальт – К, алюміній – Ю, мідь – Д, ніобій – Б, бор – Р, цирконій – Ц, азот – А (в середині марки), рідкісноземельні метали – ч, Е – селен*.

Цифра, що стоїть після букви, вказує на середній вміст легувального елемента в цілих процентах. Якщо цифра відсутня, то концентрація легувального елемента близько 1,0% (але може бути в сотих або в тисячних частках).

Цифра на початку марки легованої сталі (може бути в сотих або десятих частках процента) вказує на середню концентрацію вуглецю: дві чи три цифри в конструкційних сталях – в сотих частках процента, одна цифра в інструментальних сталях – у десятих частках процента. Якщо кількість вуглецю 1...2%, то цифра на початку марки відсутня; така сталь є інструментальною (виняток – вальницеві сталі).

Літера “А” в маркуванні, залежно від місця розташування, має різне значення. Якщо ця літера знаходиться в середині марки, вона означає азот як легувальний елемент. Якщо літера “А” знаходиться на початку марки, вона означає особливу групу сталей – автоматні сталі. Нарешті, літера “А” наприкінці марки означає, що сталь відноситься до категорії високоякісних.

Наприклад, марка конструкційної сталі 12ХН3А означає, що сталь містить 0,12% вуглецю (0,09-0,16% C), близько 1,0% хрому (0,6-0,9% Cr), близько 3% нікелю (2,78-3,15% Ni), є високоякісною; марка інструментальної сталі ХВСГ – близько 1,0% вуглецю (0,9-1,05% C), близько 1% хрому (0,6-1,1% Cr), близько 1% кремнію (0,65-1,0% Si), марганцю 1,0% (0,6-0,9% Mn).

Зазначимо, що існують окремі випадки маркування. Так, марки вальницевих сталей позначаються буквою “Ш”, швидкорізальні сталі

маркуються буквою “Р”, після якої вказується вміст основного легувального елемента – вольфраму в цілих процентах.

Класифікація легованих сталей може проводитися за кількома ознаками:

1. *За призначенням*: конструкційні, інструментальні та з особливими властивостями.

2. *За хімічним складом* в залежності від концентрації вуглецю: маловуглецеві ($\leq 0,3\% C$); середньовуглецеві ($0,3-0,7\% C$); високовуглецеві ($> 0,7\% C$). В залежності від легувальних елементів, що присутні в складі сталі, розрізняють хромисті, хромонікелеві тощо.

3. *За якістю*: в залежності від кількості шкідливих домішок (сірки, фосфору) сталі бувають якісними, високоякісними та особливо високоякісними.

4. *За структурою у відпаленому стані*:

- *доевтектоїдні*, в них вуглецю менше ніж в т. S, мають структуру перліт та ферит (Ф+П) – наприклад, 12ХН4ВА, 20Х13, 40Х2НМА.

- *евтектоїдні*, вміст вуглецю співпадає з т. S, мають структуру перліт (П) – наприклад, 60С2;

- *заевтектоїдні*, в яких $t.S < \%$, $C \leq t.E$ мають структуру перліт та карбіди вторинні (П+K_{II}) – наприклад, ХВГ, 9ХС, 70С3А, 40Х13. Структуру визначають з урахуванням впливу легувальних елементів на точку “S” (рис. 6.2). Наприклад, 3% кремнію зсувають точку “S” до 0,6% C, і тому сталь 70С3А за структурою заевтектоїдна;

- *ледебуритний (карбідний) клас*, вміст вуглецю перевищує т. E, мають структуру П+K_I+K_{II} – наприклад, Х12М, Р6М5, Х12Ф4М, містять вуглецю більш ніж 0,8-2,0% при сумарному вмісті легувальних елементів $\geq 8\%$. Належність сталі до цього класу визначають з урахуванням впливу легувальних елементів на положення точки E (див. рис. 10.2);

- *сталі феритного класу зі структурою Ф або Ф+К* – наприклад, 08Х18Т1, 15Х25Т утворюються при введенні феритостабілізаторів (Cr, Si, W, V, Mo, Ti), що розширюють α -область (див. рис. 10.3, в), при малій кількості вуглецю ($\leq 0,15\%$) В феритних сталях відсутні поліморфні перетворення при нагріванні та охолодженні; вони не змінюють свою структуру;

- сталі аустенітного класу зі структурою A або $A+K$ – наприклад, 04X18H10, 12X18H9, 15X17AG14, утворюються при введенні аустенітостабілізаторів (Ni , Mn , N , Cu), що розширюють γ -область. Аустенітні сталі також не мають поліморфних перетворень і тому не змінюють структуру при нагріванні та охолодженні.

Структуру сталей феритного та аустенітного класів можна визначити за допомогою спеціальних діаграм.

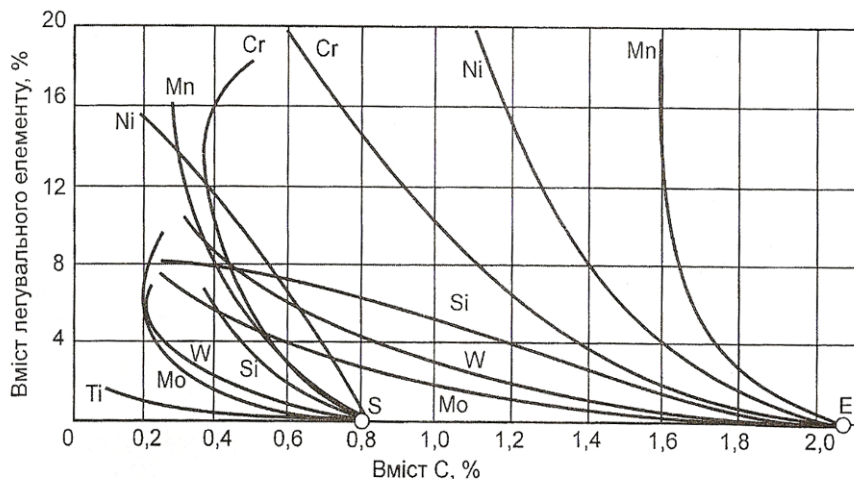


Рисунок 6.2 – Вплив легувальних елементів на положення точок S та E

Примітка. Більшість легувальних елементів зсувають точки S та E на діаграмі $Fe-Fe_3C$ в бік меншого вмісту вуглецю. Тому границя між доєвтектоїдними, евтектоїдними та заєвтектоїдними сталями в легованих сталях зміщується в бік меншого вмісту вуглецю.

5. За структурою в нормалізованому стані (охолодження на повітрі):

- *перлітні*. Здебільшого це вуглецеві та низьколеговані сталі ($\Sigma LE \leq 5\%$);
- *мартенситні*. Це середньо- та високолеговані сталі ($\Sigma LE \geq 6\%$). Є виняток: якщо в складі низьколегованої сталі кількість нікелю становить $\geq 1,5\%$ Ni , вона відноситься до перлітного класу;
- *феритні*;
- *аустенітні*.

Структурні класи *аустенітних* та *феритних сталей* після охолодження на повітрі збігаються з класифікацією у відпаленому стані.

6. *За призначенням*: конструкційні, інструментальні та з особливими властивостями.

Чавуни

Чавунами називають сплави заліза з вуглецем, що містять більш 2,14 % C. Крім вуглецю чавун містить корисні елементи *Si* (0,8-3,8%), *Mn* (0,5-1,0%), а також шкідливі домішки *P* (0,2-0,3%), $S \leq 0,15\%$. Завдяки сполученню добрих ливарних властивостей, достатній міцності, зносостійкості, а також, відносно невеликій вартості, чавуни широко застосовуються у промисловості.

Класифікація чавунів:

1. *За станом вуглецю* (вільний – у вигляді графіту або зв'язаний – у вигляді цементиту Fe_3C): білий, половинчастий, сірий, ковкий, високоміцний.

2. *За формою графіту* – сірий з пластинчастим графітом (СЧ), високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧ), ковкий чавун (КЧ) з пластівчастим графітом.

3. *За типом металевої основи (матриці)* – феритний, ферито-перлітний, перлітний.

4. *За хімічним складом* – нелеговані та леговані чавуни.

В *білому чавуні* майже весь вуглець знаходиться у зв'язаному стані у вигляді цементиту Fe_3C . Цементит надає зламу білий, блискучий вигляд. Утворюється при прискореному охолодженні у відповідності до метастабільної діаграми „залізо-цементит” ($Fe-Fe_3C$) (рис. 6.1). Білі чавуни за структурою поділяють на доєвтектичні ($2,14 < \% C < 4,3$), евтектичні ($4,3\% C$) і заєвтектичні ($> 4,3\% C$). Білі чавуни не маркуються. Із відливок сірого або високоміцного чавунів, на поверхні яких структура білого чавуну, виготовляють прокатні валки, кулі млинів для подрібнення руди.

Сірий чавун – це високовуглецевий сплав ($3,0-3,8\% C$), в якому вуглець частково або повністю знаходиться у вільному стані в вигляді пластинчастого графіту, який надає зламу сірий колір. Структура сірих чавунів формується при повільному охолодженні відповідно до діаграми стабільної рівноваги $Fe-C$ (рис. 6.3).

Утворення графіту із рідини або із аустеніту відбувається у вузькому інтервалі температур між лініями стабільної та метастабільної діаграми, тобто в умовах малих переохолоджень. Також для проходження процесу утворення графіту до складу чавуну додають такі елементи Si , Ni , Cu та Al , що є графітизаторами.

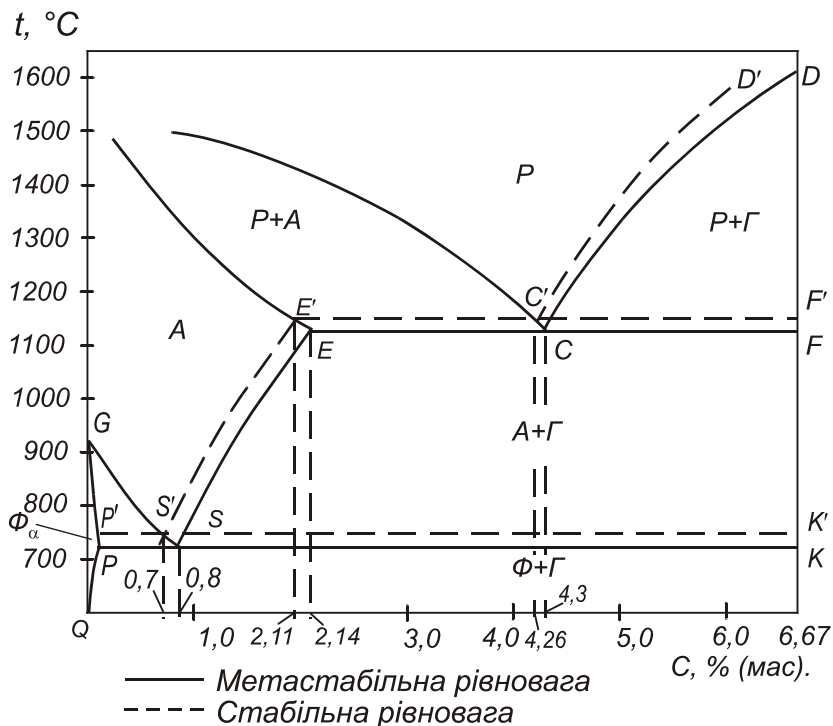


Рисунок 6.3 – Діаграма стану Fe-C

За будовою металевої основи сірі чавуни поділяють на феритні, ферито-перлітні, перлітні. Низькі механічні властивості сірих чавунів обумовлені формою графітної складової – пластинки графіту є концентраторами напружень (виконують роль надрізів).

Згідно ДСТУ 8833:2019 сірі чавуни маркуються буквами та цифрами (СЧ100, СЧ150). Цифра відповідає мінімальному значенню границі міцності при розтягуванні (відповідно 100 і 150 МПа). Сірі чавуни використовуються як матеріал для виготовлення мало- та

середньонавантажених опор, деталей сільськогосподарських машин, верстатів, автомобілів, тракторів, станин електродвигунів тощо.

Високоміцний чавун – це високовуглецевий сплав, в якому вуглець частково або повністю знаходиться у вільному стані у вигляді кулястого (глобулярного) графіту ($3,0 - 3,6\%C$, $1,2 - 2,0\%Si$, $0,3 - 0,9\%Mn$). Такий чавун отримують шляхом введення у рідкий сірий чавун поверхнево-активних елементів (або модифікаторів II роду) – магнію (Mg) та церію (Ce) в кількості $0,03...0,08\%$, які сприяють утворенню кулястої форми графіту. Як і сірі чавуни, за будовою металевої основи розрізняють феритні, ферито-перлітні та перлітні високоміцні чавуни.

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 цифрами (ДСТУ 3925-99). Наприклад, ВЧ420-12, ВЧ450-5, ... ВЧ1000-2, де цифри – це нижня границя міцності при розтягуванні (σ_B , МПа) та відносне видовження (δ , %).

Ковкий чавун – це високовуглецевий сплав, в якому вуглець частково або повністю знаходиться у вільному стані, тобто у вигляді графіту пластівчастої форми.

Ковкий чавун отримують в результаті графітизаційного відпалення (в одну або дві стадії) відливок білого доевтектичного чавуну, що містить $2,5-3,0\%C$, $1,0-1,5\%Si$, $0,3-0,8\%Mn$. Внаслідок відпалення утворюються включення графіту пластівчастої форми, які забезпечують високу пластичність ковкого чавуну ($\delta \approx 20\%$), (для білого чавуну $\delta \approx 0,2\%$). Ковкий чавун може мати феритну, ферито-перлітну або перлітну матрицю.

Ковкий чавун маркується згідно ДСТУ EN 1562:2019: КЧ 37-12, КЧ30-6. Перша цифра в марці вказує на мінімальне значення границі міцності на розтяг ($\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа), а друга – відносне видовження (в %), наприклад, КЧ 35-10: $\sigma_B = 350$ МПа, $\delta = 10\%$. 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.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Ознайомитися з основними фазами та структурними складовими вуглецевих та легованих сталей, чавунів. Вивчити класифікацію, маркування вуглецевих та легованих сталей, чавунів та їх призначення.

Підготувати табл. 6.2.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Які фази та структурні складові присутні в вуглецевих сталях і білих чавунах при кімнатній температурі у рівноважному стані?
2. Що таке ферит, аустеніт, цементит, перліт та ледебурит?
3. Чим обумовлено виділення C_{II} та C_{III} при охолодженні ?
4. Що таке сталь, класифікація вуглецевих сталей за структурою у відпаленому (рівноважному) стані.
5. Класифікація вуглецевих сталей за призначенням. Маркування вуглецевих сталей.
6. Призначення вуглецевих сталей.
7. Основні легувальні елементи та фази, які вони утворюють.
8. Елементи, що утворюють та не утворюють карбіди в сталях.
9. Елементи аустеніто- та феритостабілізатори в легованих сталях.
10. Система маркування легованих сталей. Позначення вуглецю та легувальних елементів в легованих сталях.
11. За якими ознаками класифікують леговані сталі ?
12. Що таке чавун? Як класифікують чавуни?
13. Стисло охарактеризуйте чавуни з графітом.

Матеріали, інструмент, прилади та обладнання

Набори зразків (мікрошліфів) та вироби з вуглецевих та легованих сталей у відпаленому стані, чавунів; альбоми з фотографіями мікроструктур; прилад ТШ-2 для вимірювання твердості; для дослідження структури оптичний мікроскоп МИМ-7.

Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Дослідити структуру зразків. За допомогою альбомів з фотографіями мікроструктур визначити матеріал; в табл. 6.2 записати його марку, за допомогою довідника вказати його хімічний склад, структуру та властивості.

2. Зарисувати (схематично) структуру досліджених зразків, вказати структурні складові.

Таблиця 6.2 – Хімічний склад, структура та механічні властивості залізовуглецевих сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад	Структура	Механічні властивості

Зміст звіту

1. Стисло описати фази, структурні складові залізовуглецевих сплавів.

2. Навести класифікацію вуглецевих та легованих сталей, чавунів та їх призначення.

3. Схематично зобразити структуру досліджених зразків та позначити структурні складові.

4. Навести заповнену таблицю 6.2.

5. Зробити висновки по роботі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

МІКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Мета роботи: засвоїти методику металографічного аналізу кольорових металів та сплавів на їх основі; навчитися візуально розпізнавати їхні основні структурні складові за допомогою мікроскопа.

Загальні відомості з теорії

Сплави кольорових металів використовуються в машинобудуванні в меншому обсязі, ніж сплави на основі заліза. Однак вони мають деякі особливості: високу границю пружності, корозійну стійкість, малу густину (*Al, Ti, Mg*), високу тепло- та електропровідність, антифрикційні властивості, які необхідні для певної номенклатури деталей [5].

Сплави на основі міді

Мідь – метал з температурою плавлення 1083 °C та густиною 8940 кг/м³, має кристалічну ґратку ГЦК. Володіє високою тепло- та електропровідністю, пластичністю та корозійною стійкістю. До недоліків відносять високу густину, погану обробку різанням через високу в'язкість, низьку рідкотекучість.

В машинобудуванні широко використовують латуні та бронзи. Латуні – це подвійні та багатокомпонентні сплави на основі міді, в яких основний легувальний елемент – *Zn* (його вміст не перевищує 50% мас.) За хімічним складом латуні ділять на подвійні, що відносяться до системи *Cu-Zn*, та спеціальні (леговані), що відносяться до системи *Cu-Zn-легувальні елементи*. При легуванні спеціальних латуней *Al, Fe, Ni, Mn, Si* та *Sn* підвищується їх міцність, корозійна стійкість, пружні властивості при збереженні пластичності. *Цинк, алюміній, олово* підвищують пластичність латуні до 65%.

За технологічними ознаками спеціальні латуні поділяють на деформівні та ливарні; за структурою – однофазні (α) та двофазні ($\alpha+\beta$).

Для маркування латуней використовують змішане позначення буквами та цифрами: буква Л – латунь, А – алюміній, О – олово, С –

свинець, Ж – залізо, К – кремній, Мц – марганець, Н – нікель, Мш – миш'як; цифри вказують на середній вміст у відсотках міді або цинку та легувальних елементів. Приклад маркування: Л90 – подвійна деформівна латунь (90%Cu; 10%Zn); ЛЖМц59-1-1 – спеціальна деформівна латунь (59%Cu; 1%Fe; 1%Mn; решта – цинк); ЛЦ30А3 – ливарна латунь (30%Zn; 3%Al; основа – мідь). При маркуванні ливарних латуней, на відміну від деформівних, вказують концентрацію цинку.

Латуні широко застосовуються в сантехніці й теплотехніці (кульові крани, фітинги, трубки теплообмінників), машинобудуванні та електротехніці (втулки, підшипники ковзання, шестерні, контакти й клеми), військовій промисловості (патронні гільзи), суднобудуванні (гребні гвинти, корозійностійка арматура), а також при виготовленні духових музичних інструментів, меблевої фурнітури, предметів декору та біжутерії.

Бронзи – подвійні та багатокомпонентні мідні сплави, в яких цинк не є основним легувальним елементом. *За хімічним складом виділяють дві групи бронз: олов'яні та безолов'яні (алюмінієві, берилієві, кремнієві, марганцеві, свинцеві); за технологічними ознаками – на ливарні та деформівні. В залежності від хімічного складу, бронзи можуть бути однофазні та багатофазні.*

Для маркування бронз використовують змішане позначення буквами та цифрами: букви Бр – бронза, О – олово, А – алюміній, С – свинець, К – кремній, Б – берилій, Ф – фосфор, Н – нікель, Т – титан, Ж – залізо, Ц – цинк, Х – хром, Ср – срібло, Кд – кадмій, Цр – цирконій, Су – сурма, Мг – магній, Ко – кобальт, Мц – марганець; цифри вказують на середній вміст легувального елементу у відсотках. Приклад маркування: БрАЖН10-4-4 – деформівна алюмінієва бронза (10%Al, 4%Fe, 4%Ni, мідь – основа); БрО4Ц4С17 – ливарна олов'яна бронза (4%Sn, 4%Zn, 17%Pb, мідь – основа).

Бронзи широко застосовуються в машинобудуванні для виготовлення деталей тертя й відповідальних вузлів (вальниць ковзання, втулок, черв'ячних коліс, шестерень, клапанів), у суднобудуванні та хімічній промисловості (гребних гвинтів, валів, елементів насосів і фасонного литва для агресивних середовищ), в електротехніці й приладобудуванні (пружних контактів, мембран, роз'ємів і берилієвих пружин), а також у виготовленні пружин, художнього литва, монументальної скульптури та монет.

Алюмінієві сплави

Алюміній – метал із температурою плавлення 660°C та густиною 2700 кг/м^3 . Має кристалічну ГЦК-гратку. Має добрі електро- та теплопровідність, високі показники пластичності та корозійної стійкості внаслідок утворення на поверхні щільної оксидної плівки Al_2O_3 . Зварюється майже усіма видами зварювання.

Сплави алюмінію набули широкого застосування завдяки високій питомій міцності ($\sigma_{\text{в}}/\text{гп}$). Більшість з них мають високу корозійну стійкість, здатність протистояти інерційним та динамічним навантаженням та добру технологічність.

Алюмінієві сплави легують *Cu, Mg, Si, Mn*, інколи – *Ni, Ti, Cr, Zn*, завдяки чому структура алюмінієвих сплавів зазвичай складається з матричного твердого розчину та надлишкових інтерметалідних фаз.

За технологією виготовлення алюмінієві сплави бувають деформівними, ливарними, спеченими.

Маркування алюмінієвих сплавів здійснюється згідно з буквено-цифровою системою: деформовані сплави позначають за складом чи номером, наприклад, АМг5, Д16, В95, а ливарні – літерами АК із вмістом кремнію, наприклад, АК12.

Алюмінієві сплави широко застосовують в авіації, космонавтиці та автобудуванні (елементи планера, кузовів і дисків), будівництві та архітектурі (фасадні системи, віконні профілів і мостових конструкцій), харчовій і хімічній промисловості (ємності, пакувальна фольга), а також у машинобудуванні (ливарні сплави для виготовлення складних корпусних деталей, блоків циліндрів і поршнів двигунів).

Сплави на основі титану

Титан – метал, що має дві поліморфні модифікації: до 882°C – $\alpha\text{-Ti}$ з ГЦП кристалічною граткою, вище 882°C – $\beta\text{-Ti}$ з ОЦК граткою. Його температура плавлення становить 1668°C , а густина – 4500 кг/м^3 . Чистий титан поєднує помірну міцність із задовільною деформаційною здатністю. На поверхні титану присутня стійка оксидна плівка, тому він має високу корозійну стійкість у прісній та морській воді і деяких кислотах (H_2SO_4 , HCl). Зі збільшенням кількості домішок підвищується його міцність та знижується пластичність, корозійна стійкість. Зварювання титану ускладнене

через його високу хімічну активність, схильність до росту зерна при високих температурах та поліморфні перетворення. Обробка різанням погана. Технічний титан маркують ВТ1-0, ВТ1-00.

Титанові сплави порівняно з алюмінієвими та магнієвими мають більшу питому міцність, жароміцність та корозійну стійкість. Працюють до температур 400...550°C.

Основними легувальними елементами титанових сплавів є *Al, Mo, V, Mn, Cr, Sn, Si, Zr, Nb, Fe*. За структурою у відпаленому стані розрізняють α , псевдо- α , ($\alpha+\beta$)-, псевдо- β - та β -сплави.

Маркування титанових сплавів є буквено-цифровим, воно складається з індексу розробника (ВТ, ОТ, АТ) та номера марки (наприклад, ВТ6, ОТ4), при цьому ливарні сплави відрізняються від деформівних обов'язковим додаванням літери «Л» наприкінці позначення (наприклад, ВТ6Л).

Титанові сплави широко використовують в авіакосмічній галузі (для виготовлення відповідальних деталей двигунів, елементів планера та шасі), хімічному й нафтогазовому машинобудуванні (реактори, теплообмінники, трубопроводи), суднобудуванні, енергетиці, а також у медицині для виробництва ортопедичних імплантатів, ендопротезів і хірургічного інструменту.

Сплави на основі магнію

Магній має ГЦП ґратку, температура плавлення 650°C, густина дорівнює 1740 кг/м³. Він має низькі показники теплопровідності та пластичності. Корозійна стійкість *магнію* низька, оксидна плівка не забезпечує захисних властивостей. Магнієві сплави задовільно зварюються, легко оброблюються різанням.

Найбільш поширеними легувальними елементами магнієвих сплавів є *Al, Zn, Mn, Mg–Zr* та рідкісноземельні метали (*Nd, Th, Ce*). Фазовий склад магнієвих сплавів представлений матричним твердим розчином та надлишковими інтерметалідними фазами.

За способом виготовлення магнієві сплави поділяють на дві основні групи: деформівні та ливарні.

Для позначення марок магнієвих сплавів використовують буквено-цифрове позначення: деформівні сплави позначають літерами МА та порядковим номером марки (наприклад, МА2, МА8), а ливарні – літерами МЛ з відповідним номером (наприклад, МЛ5, МЛ10).

Магнієві сплави широко застосовуються в галузях, де вирішальним чинником є мінімізація маси конструкцій: в авіакосмічній промисловості (деталі двигунів, корпуси приладів, елементи систем керування), автомобілебудуванні (картери коробок передач, каркаси сидінь, деталі кермового управління для підвищення паливної економічності та збільшення пробігу електромобілів), приладобудуванні та виготовленні легких корпусних деталей портативної електроніки (ноутбуків, камер, смартфонів), а також у сучасній медицині для створення біодеградовних ортопедичних імплантатів.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Ознайомитися з загальними відомостями щодо сплавів на основі міді, алюмінію, титану та магнію. Вивчити принципи маркування та призначення таких сплавів.

Підготувати табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Хімічний склад, структура та механічні властивості кольорових сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад	Структура	Механічні властивості

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. Мідь та сплави на її основі; їх маркування та застосування.
2. Алюміній. Основні легувальні елементи алюмінієвих сплавів. Маркування та використання сплавів на основі алюмінію.
3. Титан. Титанові сплави, їх маркування та призначення.
4. Магній та сплави на його основі; їх маркування та галузі використання.

Матеріали та обладнання

Набори зразків (мікрошліфів) сплавів на основі міді, алюмінію, титану та магнію; деталі з кольорових сплавів; альбоми з

фотографіями мікроструктур; прилад ТШ-2 для вимірювання твердості; для дослідження структури оптичний мікроскоп МИМ-7.

Вказівки з техніки безпеки

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

Порядок виконання роботи

1. Переглянути мікроструктуру зразків кольорових сплавів. За допомогою альбомів з фотографіями мікроструктур визначити матеріал; в табл. 7.1 записати його марку, за допомогою довідника вказати його хімічний склад, структуру та властивості.

2. Зарисувати (схематично) структуру досліджених зразків, вказати структурні складові.

Зміст звіту

1. Стисло охарактеризувати сплави на основі міді, алюмінію, титану та магнію.

2. Схематично зобразити структуру досліджених зразків та позначити структурні складові.

3. Навести заповнену таблицю 7.1.

4. Зробити висновки по роботі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Металознавство / О.М. Бялік та ін. Київ: ІВЦ "Політехніка", 2001. 375 с.
2. Афтанділянц Є.Г., Зазимко О.В., Лопатько К.Г. Матеріалознавство. Київ: Вища освіта, 2012. 548 с.
3. Матеріалознавство / С.С. Дяченко та ін. Харків: ХНАДУ, 2007. 440 с.
4. Климов О.В., Кононенко Ю.І., Грешта В.Л. Сталі та сплави з особливими властивостями: навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 315 с.
5. Кольорові метали і сплави: навчальний посібник / В.Л. Грешта та ін. Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. 336 с.
6. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів: методичний посібник / Р.В. Подольський та ін. Дніпро: Україн. держ. ун-т науки і технол. 2022. 66 с.

ДОДАТОК А

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ІЗ ДИСЦИПЛІНИ “МЕТАЛОГРАФІЯ” В ЛАБОРАТОРІЯХ КАФЕДРИ ФІЗИЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

1. Практична частина лабораторних робіт виконується студентами лише в присутності викладача або лаборанта.

2. Перед проведенням лабораторних робіт студенти повинні звернути увагу на небезпечні та шкідливі фактори за вказівкою викладача.

3. При шліфуванні та поліруванні зразків необхідно користуватися окулярами для запобігання травмування очей.

4. Якщо при поліруванні зразок вирвано із рук, негайно відключити верстат від електричної мережі.

5. При травленні зразків у водних або спиртових розчинах лугів, солей, кислот остерігатись їх попадання на відкриту шкіру та очі. Якщо це трапилось, необхідно промити забруднені місця водою.

6. Після закінчення роботи на металографічному мікроскопі МИМ-7 вимкнути мікроскоп із електромережі, закрити чохлами та вимкнути головний рубильник.

7. По завершенні практичної частини лабораторної роботи необхідно відключити обладнання від електричної мережі.

8. У випадку загорання в лабораторії вжити заходи по його усуненню за допомогою первинних засобів пожежегасіння. Коли це не можливо, студенти повинні покинути лабораторію, а викладач зобов'язаний вжити усіх заходів по гасінню пожежі і сповістити адміністрацію.