

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних та контрольних робіт з дисципліни

“Металознавство”

для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство»
денної та заочної форм навчання

І частина

2023

Методичні вказівки до лабораторних та контрольних робіт з дисципліни «Металознавство» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» денної та заочної форм навчання (І частина) / Укл.: Л.П. Степанова, Ю.І. Кононенко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023,- 70 с.

Укладачі: Л.П. Степанова, к.т.н., доц.
Ю.І. Кононенко, ст. викл.

Рецензент: В.Ю. Ольшанецький, д.т.н., проф.

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

Рекомендовано
до видання НМК інженерно-
фізичного факультету
Протокол №8
від «11 »квітня

Затверджено
на засіданні кафедри
Фізичне матеріалознавство
Протокол № 6
від 02 березня 2023 р.

ЗМІСТ

ЧАСТИНА І

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ.....	6
--------------------------	---

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 Виготовлення металографічних шліфів.....	9
1.1 Загальні відомості з теорії.....	9
1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	13
1.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	13
1.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	13
1.5 Вказівки з техніки безпеки.....	13
1.6 Порядок виконання роботи.....	13
1.7 Зміст звіту.....	14
1.8 Література.....	14

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 Макроскопічний метод дослідження металів та сплавів.....	15
2.1 Загальні відомості з теорії.....	15
2.1.1 Макроаналіз зламів та визначення характеру руйнування	15
2.1.2 Макроаналіз структури за допомогою макрошліфа.....	18
2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	24
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	24
2.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	25
2.5 Вказівки з техніки безпеки.....	25
2.6 Порядок виконання роботи.....	25
2.7 Зміст звіту.....	25
2.8 Література.....	25

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 Мікроскопічний метод дослідження металів та сплавів.....	26
3.1 Загальні відомості з теорії.....	26
3.1.1 Призначення мікроаналізу і формування зображення у мікроскопі.....	26

3.1.2 Роздільна здатність світлової оптики.....	29
3.1.3 Принцип роботи і оптична схема мікроскопа МИМ-7.....	29
3.1.4 Основні системи мікроскопа.....	33
3.1.5 Порядок роботи на мікроскопі при візуальному спостереженні структури.....	36
3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	37
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	37
3.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	37
3.5 Вказівки з техніки безпеки.....	37
3.6 Порядок виконання роботи.....	37
3.7 Зміст звіту.....	38
3.8 Література.....	38

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 Кількісний металографічний

аналіз металів та сплавів.....	39
4.1 Загальні відомості з теорії.....	39
4.1.1 Допоміжні пристрої до мікроскопа.....	39
4.1.2 Вимірювання мікроскопічних об'єктів за допомогою окуляра-мікрометра.....	40
4.1.3 Визначення величини зерна за стандартною шкалою (ГОСТ 5639-82).....	41
4.1.4 Визначення величини зерна методом підрахунку зерен на одиниці площі шліфа.....	42
4.1.5 Визначення фазового складу (точковий метод Глаголева).....	42
4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	46
4.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	46
4.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	46
4.5 Вказівки з техніки безпеки.....	47
4.6 Порядок виконання роботи.....	47
4.7 Зміст звіту.....	47
4.8 Література.....	47

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 Вивчення процесу

первинної кристалізації.....	48
5.1 Загальні відомості з теорії.....	48

5.1.1 Механізм і кінетика процесу кристалізації.....	48
5.1.2 Форма кристалів та будова зливків.....	53
5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	55
5.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	55
5.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	56
5.5 Вказівки з техніки безпеки.....	56
5.6 Порядок виконання роботи.....	56
5.7 Зміст звіту.....	56
5.8 Література.....	56

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 Вплив холодної пластичної деформації та рекристалізації на структуру та властивості сталі.....

6.1 Загальні відомості з теорії.....	57
6.1.1 Пружна та пластична деформації.....	57
6.1.2 Структура та властивості холоднодеформованих металів.....	61
6.1.3 Вплив нагрівання на структуру та властивості холоднодеформованого металу.....	63
6.1.4 Діаграми рекристалізації. Критичний ступінь деформації. Розмір зерна після рекристалізації.....	66
6.1.5 Холодна та гаряча деформації.....	68
6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	68
6.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	68
6.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	69
6.5 Вказівки з техніки безпеки.....	69
6.6 Порядок виконання роботи.....	69
6.7 Зміст звіту.....	70
6.8 Література.....	70

Частина II

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Студенти при проведенні лабораторних робіт з дисципліни «Металознавство» повинні засвоїти загальні закономірності первинної кристалізації; структурні зміни в металах і сплавах при холодній пластичній деформації та при їх подальшому нагріванні; фазові та структурні зміни в залізобуглецевих сплавах при охолодженні на нагріванні; вплив легувальних елементів на поліморфізм заліза і фазові перетворення у системах із різним рівнем легування; роль структури у формуванні властивостей матеріалів.

Також студенти повинні вміти аналізувати структури, які утворюються в подвійних та потрійних системах; навчитися визначати структуру, фазовий склад і прогнозувати властивості залізобуглецевих сплавів; виготовляти шліфи та виявляти структуру при користуванні оптичним мікроскопом.

Вступ. Будова металів та сплавів. Металографічні методи дослідження. Вступ. Значення та задачі курсу. Загальні відомості про фізико-механічні властивості металів та сплавів. Устрій і принцип роботи оптичного мікроскопа. Металографічні методи дослідження. Макроскопічний та мікроскопічний метод дослідження. Кількісна металографія.

Кристалізація металів. Будова рідких металів. Поняття ближнього і дальнього порядку. Термодинаміка та кінетика первинної кристалізації, криві охолодження при твердінні металу. Основні параметри кристалізації. Гомогенна самодовільна кристалізація. Зміна вільної енергії при кристалізації та утворенні зародків критичного розміру. Зв'язок між швидкістю та ступенем переохолодження. Розмір зерна. Гетерогенна (несамодовільна) кристалізація. Роль вкраплень та стінок форми у формуванні структури при зародженні кристалів. Форма та будова кристалів. Дендритна кристалізація. Концентраційне переохолодження. Модифікування, мета та вплив на властивості. Будова зливків СП, КП сталей, транскристалізація. Дефекти, які виникають при кристалізації. Види ліквації, методи усунення, вплив на будову та властивості сплавів. Неметалеві вкраплення, методи виявлення, ідентифікація. Аморфні металеві сплави. Нанокристалічні сплави, технологія одержання, властивості.

Деформація та рекристалізація. Пружна та пластична деформація. Деформація ковзанням і двійникуванням. Системи ковзання в ґратках металів. Дислокаційний механізм ковзання при пластичній деформації. Особливості деформації моно- та полікристалів. Зміни зеренної структури при пластичній деформації. Утворення текстур деформації Властивості холоднодеформованого металу. Основні процеси, що відбуваються при нагріванні (відпочинок, полігонізація, первинна і збиральна рекристалізація). Поняття вторинної рекристалізації. Зміна структури та властивостей при нагріванні холоднодеформованих металів. Критичний ступінь деформації. Розмір зерна після рекристалізації. Холодна, тепла і гаряча деформація металів. Процеси, що відбуваються під час гарячої деформації металів, структурні зміни.

Теорія будови сплавів. Фази в металевих системах. Формування структури у твердому стані. Будова твердих фаз. Тверді розчини заміщення, втілення і вилучення. Фактори, які впливають на розчинність у твердому стані. Основні групи проміжних фаз: електронні сполуки (фази Юм-Розері), фази втілення (карбіди, нітриди), сигма-фази, Лавеса, фази нікель-арсенідного типу. Упорядковані тверді розчини.

Структурні зміни в металах. Роль дефектів при структуроутворенні. Самодифузія і гетеродифузія. Основні механізми дифузії. Блочна структура зерна. Будова меж зерен і блоків. Ріст зерна при нагріванні. Поліморфні перетворення.

Залізо та його сплави. Компоненти в системі залізо-вуглець. Чисте залізо (його поліморфні модифікації, властивості). Вуглець, його поліморфні модифікації, їх властивості. Будова та властивості цементиту. Характеристика фаз та структурних складових, їх властивості. Значення діаграми фазової рівноваги залізо-вуглець. Діаграма фазової метастабільної рівноваги залізо-вуглець. Криві ліквідус, солідус. Нонваріантні рівноваги в системі. Інтервали поліморфних перетворень в сплавах із різним вмістом вуглецю. Критичні точки (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_{cm}). Кристалізація сплавів залізо-цементит. Фазові та структурні зміни в сплавах при охолодженні та нагріванні. Застосування правила фаз. Правило концентрацій і відрізків. Структурні класи в рівноважному стані. Вплив постійних домішок на властивості сталей. Вплив вуглецю на властивості сталей.

Класифікація вуглецевих сталей за якістю. Маркування вуглецевих сталей. Класифікація вуглецевих сталей за призначенням.

Особливості структури литої та деформованої сталі. Вплив хімічної неоднорідності на макро- і мікроструктуру литої та гарячедеформованої сталей. Особливості мікроструктури сталей. Відманштеттова структура доевтектоїдних та заевтектоїдних сталей, феритна смугастість, рядкові структури, аномальні структури (структура зернистого перліту, відокремлений евтектоїд). Зневуглицювання.

Високовуглецеві сплави, чавуни. Загальна характеристика. Формування структури під час твердіння високовуглецевих сплавів. Білі чавуни (структура, властивості). Процес графітизації. Стабільна діаграма стану залізо-вуглець. Сірі чавуни. Умови утворення графіту. Діаграма залізо-вуглець-кремній. Структурні діаграми. Маркування сірих чавунів. Властивості, призначення, домішки в чавунах. Модифікування. Вибіл чавуну. Високоміцні чавуни. Маркування. Структура, властивості. Чавун із вермікулярним графітом. Ковкі чавуни. Відпалення відливок із білого чавуну. Структура, властивості, призначення. Маркування. Порівняння властивостей чавунів. Спеціальні чавуни (зносостійкі, жаростійкі, корозійностійкі).

Леговані сталі. Вплив легувальних елементів на структуру і властивості сталей. Характеристика фаз в легованих сталях (тверді розчини, карбідні і інтерметалідні фази). Елементи карбідо- та некарбідоутворювачі. Вплив легувальних елементів на поліморфні перетворення (ферито- і аустенітостабілізатори) та критичні точки в сталях. Вплив легувальних елементів на поліморфізм заліза (α - і γ -стабілізатори). Вплив двох легувальних елементів на поліморфізм заліза, коли обидва легувальні елементи або α - або γ -стабілізатори. Сумісна дія елементів, різних за впливом на поліморфізм. Знайомство з діаграмою залізо-вуглець-хром. Знайомство з реальними діаграмами залізо-легувальний елемент (хром, нікель, марганець, вольфрам, молібден). Вплив легувальних елементів на властивості фериту. Маркування легованих сталей. Вплив легувальних елементів на концентраційні точки. Класифікація легованих сталей за вмістом вуглецю та якістю. Структурні класи легованих сталей в рівноважному стані. Класифікація легованих сталей за призначенням.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ШЛІФІВ

Мета роботи: засвоїти практику виготовлення металографічних шліфів.

1.1 Загальні відомості з теорії

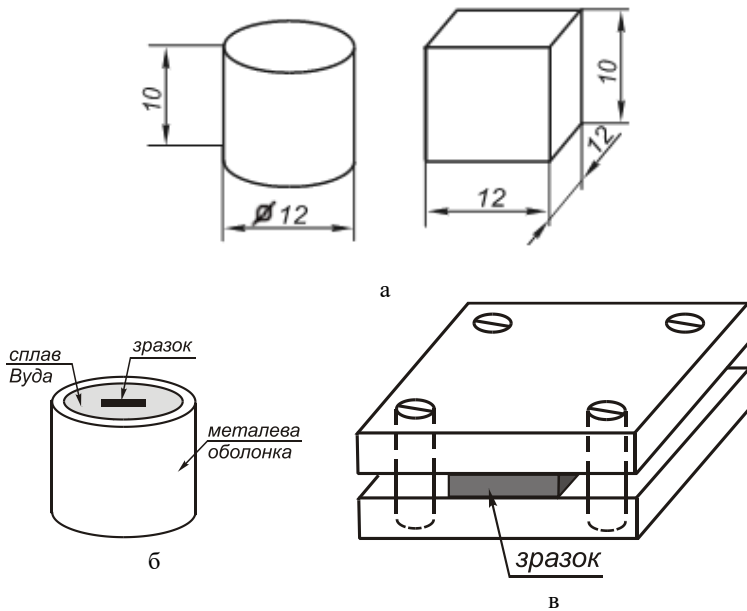
Для мікроскопічного дослідження структури металів необхідна плоска дзеркальна поверхня, що добре відбиває світлові промені. Таку поверхню отримують на спеціально виготовлених зразках, які називають мікрошліфами.

Зразок для мікрошліфа вибирають з тієї частини виробу або заготовки, яка при дослідженні має 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 для усунення наслідків пошкодження поверхні при різанні. 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 рисок 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 рисок, 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.

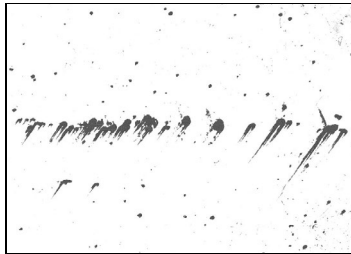
Для виявлення структури поверхню мікрошліфа занурюють у реактив. Час травлення (5-40 с) залежить від хімічного складу зразка та його структурного стану. Найбільше поширення для вуглецевих, малолегованих і середньолегованих сталей та чавунів мають спиртові розчини азотної кислоти (звичайно 2-5%-ної концентрації).



а



б



в

а – поверхня після грубого шліфування;

б – поверхня після тонкого шліфування;

в – поверхня після полірування (помітні неметалеві вclusions 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.

1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Засвоїти послідовність операцій при виготовленні металографічних шліфів та методику травлення.

1.3 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 ?

1.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Зразки вуглецевої сталі (діаметр 20-25мм, товщина 10-12мм). 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.

1.5 Вказівки з техніки безпеки

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

1.6 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.

1.7 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.

1.8 Література

[2] с. 7-27, [9] с. 43-48

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

МАКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

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

2.1 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 знайшов широке застосування, 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 чи на спеціальних макрошліфах, якщо макроструктуру виявляють травленням шліфованої поверхні зразка.

2.1.1 Макроаналіз зламів та визначення характеру руйнування

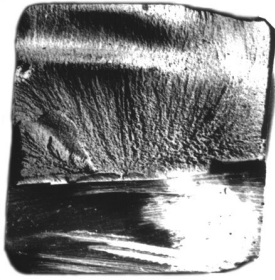
Вивчають злами, які утворюються під час руйнування деталі або які отримують при випробуванні зразків.

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

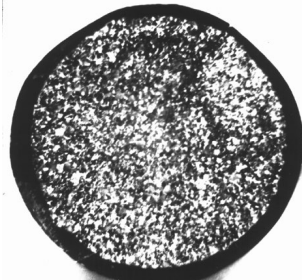
Волокнистий злам має матовий колір, форма та розмір зерен сильно порушені, що свідчить про значну пластичну деформацію під час руйнування (рис. 2.1, а).

Кристалічний злам – результат крихкого руйнування під дією нормальних напружень. Зерна при цьому не деформуються,

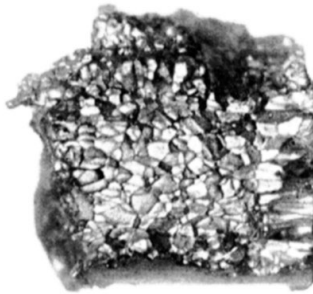
зберігається їх форма та розмір. Кристалічний злам характеризується наявністю окремих мікросколів, що дають у сукупності блискучий фон без помітних ознак деформації зразка в місці зламу (рис. 2.1, б).



а



б



в

а – в'язкий волокнистий;

б – крихкий кристалічний;

в – каменеподібний

Рисунок 2.1 – Види зламів

При оцінюванні зламу потрібно враховувати характер навантажень, що прикладають (ударні чи статичні), тому що 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 розрізняються. Відмінність пов'язана із швидкістю поширення тріщини, що визначається структурою та

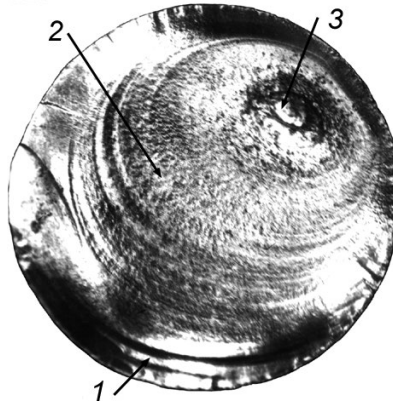
властивостями матеріалу. При крихкому руйнуванні ця швидкість дуже велика і досягає 0,5 швидкості поширення звуку в матеріалі. У випадку в'язкого руйнування тріщина розповсюджується з малою швидкістю, яка порівнюється зі швидкістю деформації зразка.

У полікристалах тріщина під час руйнування може розповсюджуватися по тілу зерна, в такому випадку злам називають *внутрішньокристалітним (транскристалітним)*, або вздовж меж зерен, в цьому випадку злам називають *міжзеренним (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 крупнокристалічні злами). Перегрів сталі можна виявити за присутністю великих блискучих зерен транскристалітного зламу, який називають “нафталіновим” зломом. Сильно перегріта сталь має міжкристалітний каменеподібний злам (рис. 2.1, в). За зломом металу можна виявити наявність дефектів металургійного походження (раковини, пухирі, грубі неметалеві вкраплення), оцінити глибину дифузійного шару після хіміко-термічної обробки.

У деталях, що в процесі обробки витримують тривалі циклічні навантаження (вали, осі, шестерні, шатуни, ресори, пружини), може утворитися втомний злам. За цих умов руйнування може розвиватися при початковому напруженні, що значно нижче не лише границі міцності, а й границі плинності. Таке явище називають втомою металу, яке полягає в тому, що при багаторазових навантаженнях в місцях з найбільшою концентрацією напружень та з наявністю дефектів, різких переходів, перетинів, виникають мікротріщини.

Втомна тріщина зароджується в поверхневих шарах і потім поширюється вглиб деталі. Зазвичай цей процес тривалий і продовжується до того часу, доки переріз деталі не стає таким малим, що під дією наступного навантаження деталь руйнується. Руйнування при цьому частіше крихке, іноді (у дуже пластичних матеріалах) в'язке. Такий характер руйнування обумовлює завжди дві чітко відмінні зони (рис.2.2). Одна з них притерта – зона поступового поширення тріщини. Друга має структуру типову для крихкого руйнування – зона миттєвого зламу.



1 – зародження тріщини;
 2 – зона поступового руйнування;
 3 – зона миттєвого зламу
 Рисунок 2.2 – Злам від втоми

2.1.2 Макроаналіз структури за допомогою макрошліфа

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

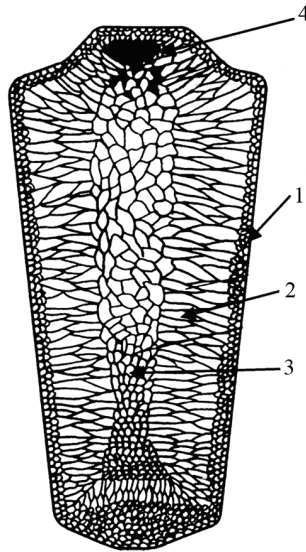
Зразок із шліфуюною та протравленою спеціальним реактивом поверхнею називають макрошліфом. Шліфування здійснюється у такий саме спосіб, як і при виготовленні мікрошліфа, але зразок може бути більшого розміру. Операцію полірування не здійснюють.

В залежності від хімічного складу сплаву і мети дослідження застосовують різні реактиви і способи травлення (глибоке, поверхневе з підігріванням та без підігрівання реактиву, знімання відбитка на папір). Склад реактивів та режими травлення приведені у спеціальній довідковій літературі.

Розглянемо деякі види макроаналізу. Будову литої сталі та сталевих зливок вивчають на повздовжніх або поперечних перетинах (темплетах) після глибокого травлення, найчастіше 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. 2.3 зображена макроструктура зливка. 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, зворотному 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.



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

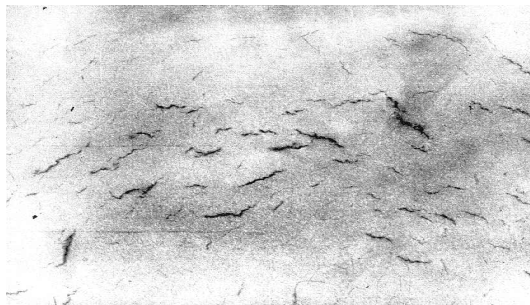
Рисунок 2.3 – Схема будови сталевго зливка

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 структури 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. 2.4, а, б).



а

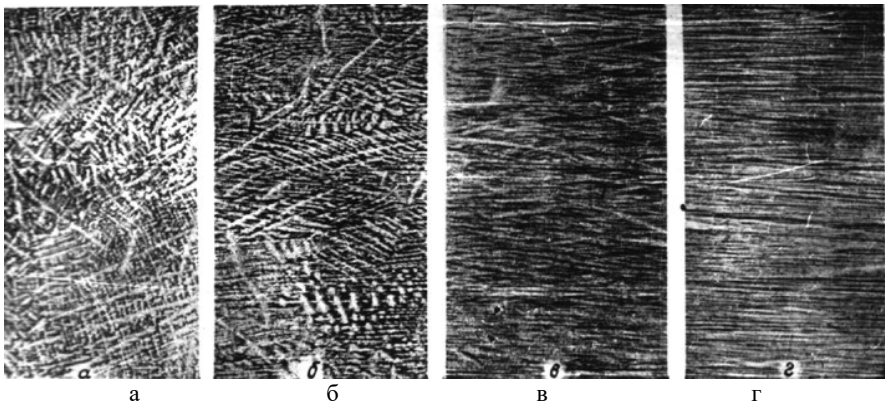


б

а – повздовжній злам;
б – поперечний макрошліф
Рисунок 2.4 – Флокени

Вважають, що частіше за все флокени утворюються при швидкому охолодженні від 200 до 20°C сталі, в якій присутній розчинений водень. При цьому водень, який виділяється із атомарної форми у молекулярну, створює великі внутрішні напруження, що спричиняє утворення 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. 2.5). Волокниста будова металу характеризується значною анізотропією властивостей, тому що в процесі гарячої обробки тиском дендритна структура зливка руйнується і дендрити витягуються у напрямку деформації.

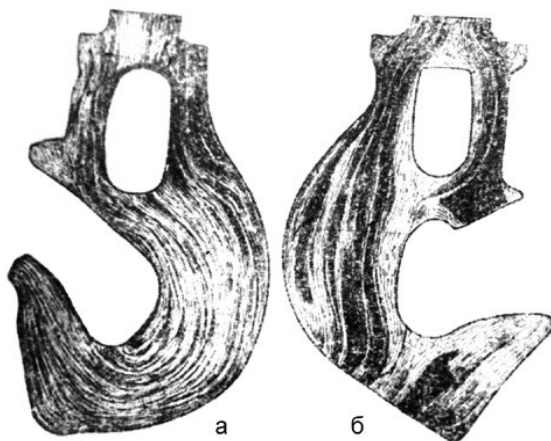


а – 0 %; б – 3 %; в – 6,9 %; г – 14 %

Рисунок 2.5 – Послідовне перетворення дендритної структури зливка у волокнисту структуру зі збільшенням ступеня деформації

Міжосні 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 макрощліфа 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 (шестерні, 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. 2.6).

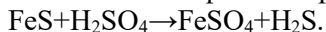


а – правильно проведена деформація;
б – неправильно проведена деформація
Рисунок 2.6 – Макроструктура гаку

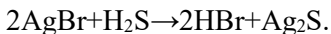
Для виявлення волокнистої будови вуглецевої сталі, яку отримують після гарячої обробки тиском литого металу, застосовують 10%-ний водний розчин азотної кислоти (3-15 хв.). Використовують і інші реактиви в залежності від хімічного складу сплаву.

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

Розподіл сірки визначають методом відбитка за Бауманом звичайно на макрошліфах повздовжнього напрямку. Фотографічний (бромсрібний) папір, який змочують на світлі у 5%-ному водному розчині сірчаної кислоти, щільно накладають стороною із емульсією 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 фотопaperі, визначають форму та характер розподілу сульфідів у досліджуваному металі (рис. 2.7). При рівномірному забарвленні можна вважати розподіл сірки рівномірним. Для зберігання відбиток слід промити водою, зафіксувати у гіпосульфиті, знову промити водою та просушити.

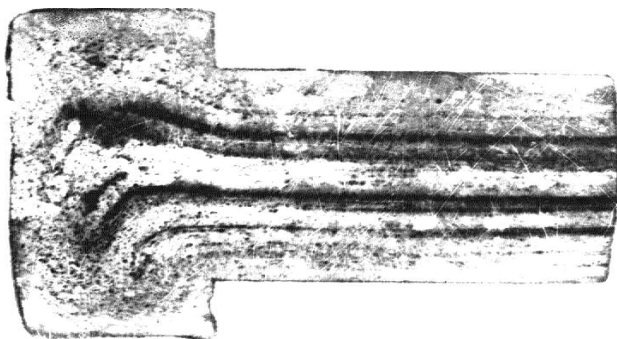


Рисунок 2.7 – Форма та характер розподілу сульфідів

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

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. 2.8.

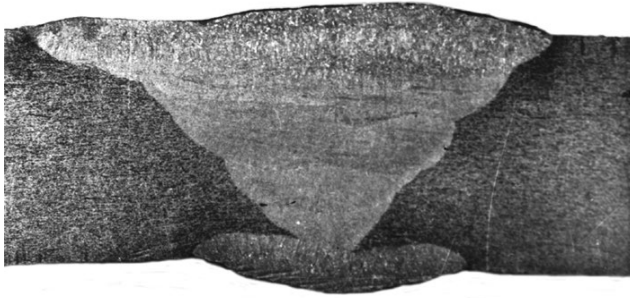


Рисунок 2.8 – Макроструктура якісного зварного з'єднання багатошаровою ручною електродуговою зваркою при Y-подібній підготовці крайок з підваренням кореня шва

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.

2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Описати призначення макроаналізу, приготування макрошліфів і дослідження зламів.

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Суть і призначення макроаналізу.
2. Види зламів. Яким чином за структурою зламу можна встановити характер руйнування матеріалу: крихке, в'язке або від втоми?
3. Що таке макрошліф? Методика його приготування.
4. Макроструктура литого та гарячедеформованого металів, їх особливості.
5. Як впливає розміщення волокон в деталях після гарячої деформації на механічні властивості?
6. Макроаналіз зварних з'єднань.

7. Як виявляють ліквідацію домішок?

2.4 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).

2.5 Вказівки з техніки безпеки

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

2.6 Порядок виконання роботи

1. Вивчити та охарактеризувати злами зразків, пояснити характер руйнування за видом зламу.
2. Вивчити будову литого та гарячедеформованого металів, визначити особливості макроструктури.
3. 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.

2.7 Зміст звіту

1. Стисло описати призначення макроскопічного аналізу, як метода дослідження металу за виглядом зламу та за допомогою макрошліфа.
2. Стисло описати методику приготування макрошліфа та реактиви, які застосовують для його травлення.
3. Дослідити, замалювати та описати макроструктуру зламів.
4. Дослідити, замалювати та описати структуру литої і гарячедеформованої сталі.
5. Виявити травленням будову зварного з'єднання. Описати методику травлення, схематично зарисувати та описати досліджені структури.

2.8 Література

[1] с.52 – 58, [9] с.12 – 21.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

МІКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Мета роботи: вивчити метод мікроскопічного аналізу, ознайомитися з будовою та принципом роботи металографічних мікроскопів МИМ-7, МИМ-8, “NU-2”

3.1 Загальні відомості з теорії

3.1.1 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; мікродфекти металу: тріщини, шпарини, раковини; неметалеві вкраплення: сульфід, оксиди, нітриди, алюмінати, карбід, графіт (в чавунах) тощо. За допомогою мікроскопа можна зафіксувати структуру на фотопластинку або на екран комп'ютера.

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 властивостями досліджених зразків.

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

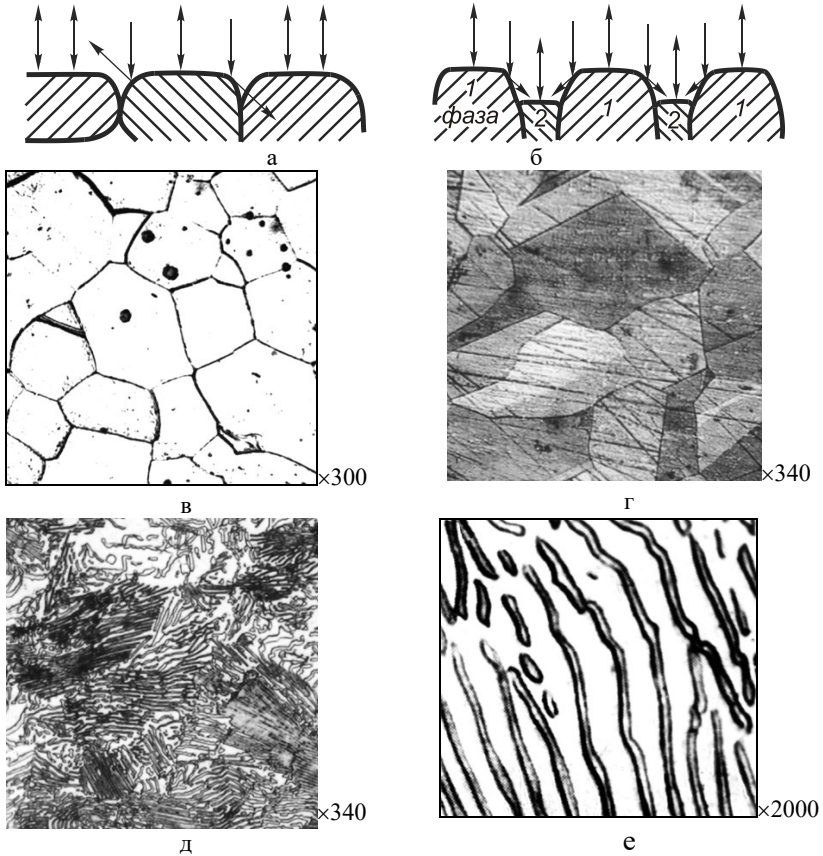
Для виявлення структури поверхню мікрошліфа травлять у розчинах кислот, солей, лугів в залежності від хімічного складу

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 довідковій 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 складається мікрорельєф у вигляді впадин та виступів. Канавки на межах зерен більше розсіюють промені, тому межі виглядають як темні лінії (рис. 3.1).

У структурі чистих металів або однофазних твердих розчинів після травлення темні лінії меж виявляють розміри зерен (рис. 3.1 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. 3.1, г).

При наявності у структурі двох або більше фаз метою травлення є найбільш повне виявлення меж зерен між різними за природою фазами та вибіркового 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. 3.1, 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. 3.1, 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 3.1 – 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 зерна, це дає змогу використовувати теплове травлення для виявлення структури та визначення природи фаз.

3.1.2 Роздільна здатність світлової оптики

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

Важливою характеристикою мікроскопа є його роздільна здатність $\left(r = \frac{1}{d}\right)$, яка визначається величиною, зворотною найменшій відстані d , на якій можна розрізнити деталі двох сусідніх елементів структури. Чим менше d , тим вище роздільна здатність r , і, відповідно, більше корисне збільшення мікроскопа, яке визначають за формулою:

$$M = D/d,$$

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

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 реалізується в електронному мікроскопі.

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

3.1.3 Принцип роботи і оптична схема мікроскопа МИМ-7

Металографічний мікроскоп МИМ-7 призначений для візуального спостереження і 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. 3.1, 3.2).

Таблиця 3.1 – 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 (оля 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 3.2 – Таблиця збільшень мікроскопа МИМ-8

Об'єктиви	Окуляри			
	7 [×]	10 [×]	15 [×]	20 [×]
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)
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'єктив F=2,8; A=1,0 використовують тільки при роботі у темному полі.				

На рис. 3.2 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), фотозатвір (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).

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

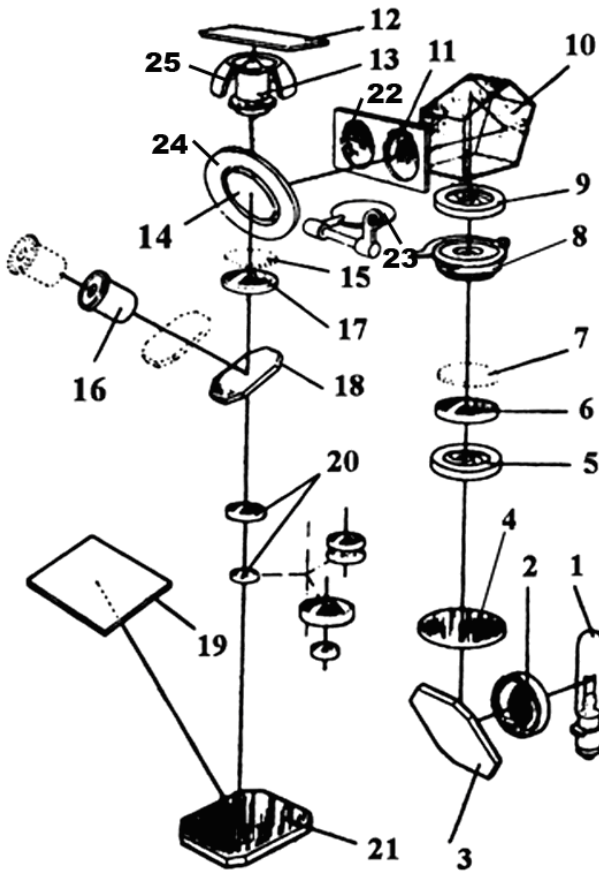


Рисунок 3.2 – Оптична схема мікроскопа МІМ-7

3.1.4 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. 3.3) 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.

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. 3.2). 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. 3.1 і 3.2).

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

де L – оптична довжина тубуса мікроскопа;

250 – відстань найкращого зору, мм;

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

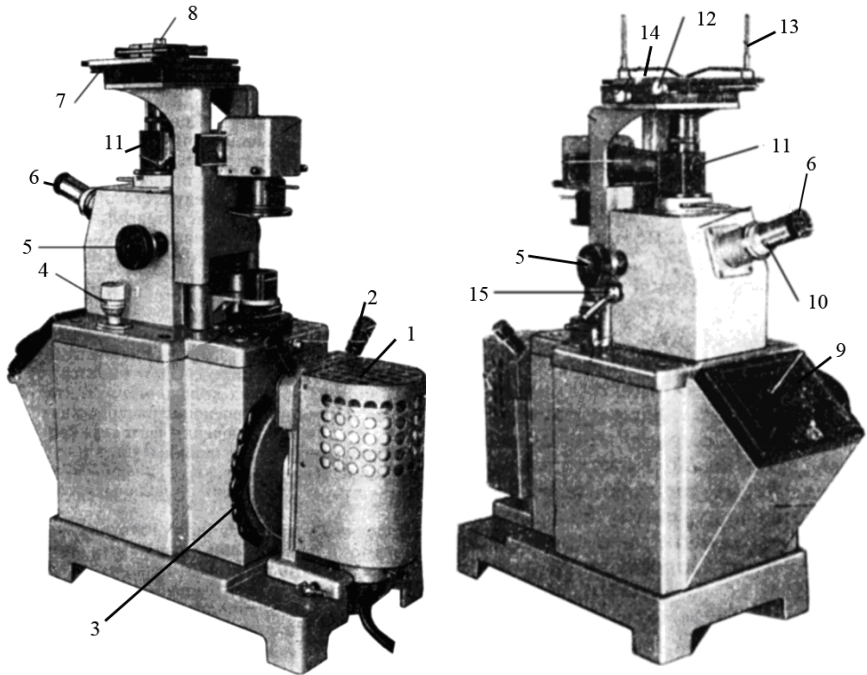


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд мікроскопа МИМ-7

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, які розміщуються в одній оправі, що спрямована до поверхні мікрошліфа. Визначений підбір лінз у об'єктиві дозволяє усунути оптичні дефекти (сферичну та хроматичну аберації). *Сферична аберація* призводить до нечіткого зображення завдяки неоднаковому заломленню променів краєм лінзи та її центральною частиною (вони не сходяться в одній точці). Для зменшення сферичної аберації об'єктив виготовляють з двох лінз – опуклої та увігнутої, які мають однакову, але по-різному спрямовану сферичну аберацію. *Хроматична аберація* полягає у неоднаковому заломленні променів різного кольору (різної довжини хвиль) при розкладанні пучка білого світла, які не мають загального фокусу. 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. 3.3) розташовується отвір для об'єктива; на патрубці 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 задвигують 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'єктив у вертикальному напрямку і точно наводить на фокус.

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

3.1.5 Порядок роботи на мікроскопі при візуальному спостереженні структури

1. Вибрати збільшення мікроскопа (об'єktiv та окуляр) у табл. 3.1 і 3.2.

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 над 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 упора.

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.

3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

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

3.3 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.

3.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків для проведення мікроаналізу; металографічні мікроскопи МИМ-7, МИМ-8 і NU-2; альбоми з фотографіями структур; реактив для травлення шліфів (4 %-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті).

3.5 Вказівки з техніки безпеки

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

3.6 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 2-50с 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.

3.7 Зміст звіту

1. Описати призначення мікроскопічного методу дослідження.
2. Описати конструкцію та принцип роботи мікроскопа МИМ-7.
3. Зарисувати оптичну схему мікроскопа МИМ-7, пояснити призначення основних вузлів, з яких складається мікроскоп та показати хід променів при візуальному аналізі і фотографуванні структури.
4. Засвоїти прийоми роботи на мікроскопі, для чого дослідити мікрошліфи до та після травлення при різному збільшенні.
5. Дослідити характерні структури, схематично зарисувати та описати результати дослідження.

3.8 Література

[2] с. 196-225; [9] с. 48-67

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

КІЛЬКІСНИЙ МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

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.

4.1 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.

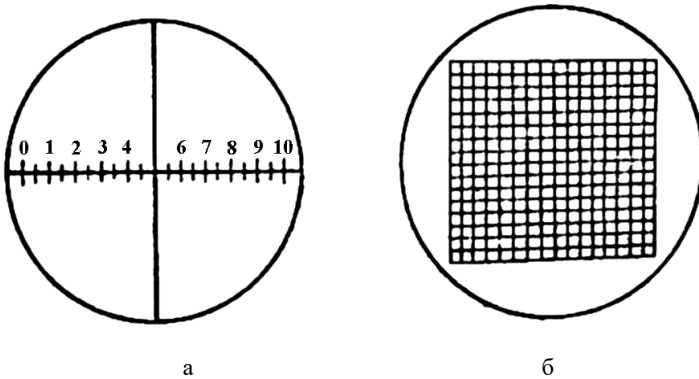
4.1.1 Допоміжні пристрої до мікроскопа

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. Це звичайний окуляр ($7\times$), у який між лінзами вставлена 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. 4.1, 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 окуляр-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

б

а – лінійка окуляра-мікрометра;

б – квадратна сітка

Рисунок 4.1 – 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 структура мікрошліфа.

4.1.2 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, вкращення);

- 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. 4.1, а);

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

4.1.3 Визначення величини зерна за стандартною шкалою (ГОСТ 5639-82)

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 вищий рівень механічних властивостей, 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. 4.2).

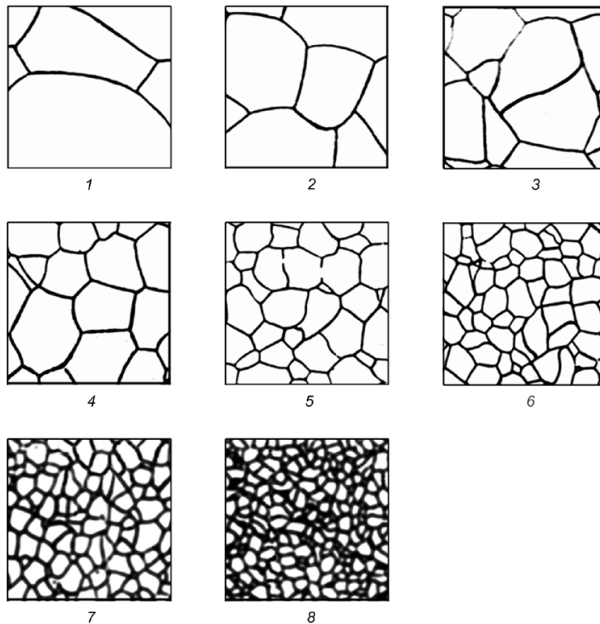


Рисунок 4.2 – Шкала для визначення номеру зерна. Збільшення $\times 100$

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%.

4.1.4 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. 4.1, 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 4.1 (ГОСТ 5639-82) визначають величину зерна.

4.1.5 Визначення фазового складу (точковий метод Глаголева)

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 (Розівалія);
- точковий (Глаголева).

Планіметричний метод ґрунтується на оцінці площини перетину частинки за масою. Об'єктом визначення є мікрофотографія. Перетини мікрочастинок вирізають та зважують, групуючи за належністю до певної фази. Планіметричний метод має високу точність, але займає 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.

Таблиця 4.1 – Робоча таблиця для визначення розмірів зерен

Номер зерна	Площа зерна, мм^2			Кількість зерен на площі 1 мм^2			Середня кількість зерен у 1 мм^3	Середній діаметр зерен за розрахунком, мм	Середній діаметр зерна, мм	ГОСТ 9639-82
	найменша	середня	найбільша	найменша	середня	найбільша				
-3	0,640	1,024	1,280	0,75	1	1,5	1	1,0	0,875	Сталь. Методи виявлення та визначення величини зерна
-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	
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	

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 кожну 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. 4.3 – 187). Наприклад: необхідно визначити співвідношення фазових складових у сплаві, структура якого показана на рис. 4.3.

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 різних ділянок мікрошліфа, а потім визначається середнє значення:

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

де n – кількість вибраних ділянок мікрошліфа.

Результати досліджень заносять у таблицю 4.2.

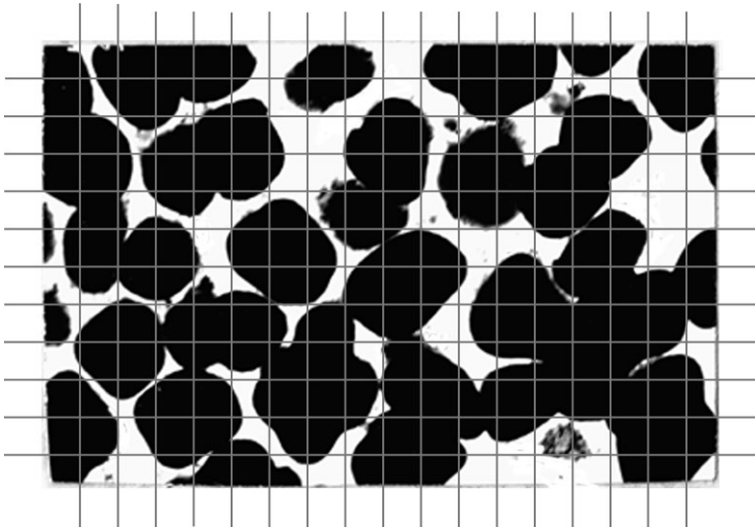


Рисунок 4.3 – Структура жароміцного сплаву на Ni-основі. Темна складова – зміцнювальна γ' -фаза ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$); світла фаза – матриця нікелевого сплаву (γ -твердий розчин на основі нікелю)

Таблиця 4.2 – Визначення об'ємної кількості фаз

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

4.2 Завдання на підготовку лабораторної роботи

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

Підготувати таблицю 4.2.

4.3 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.

4.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

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

4.5 Вказівки з техніки безпеки

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

4.6 Порядок виконання роботи

1. Вивчити будову та призначення допоміжних пристроїв для відліку та вимірювання.
2. Навчитися визначати ціну позначки окуляр-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 точковим методом за допомогою спеціальної сітки.

4.7 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, записати одержані дані.
3. Провести підрахунок об'ємної кількості кожної фази або структурних складових точковим методом Глаголева.

4.8 Література

[1] с. 174-177; [7] с. 86-95, 112-124; [9] с. 37-43.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРВИННОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Мета роботи: вивчити механізм та кінетику процесу кристалізації.

5.1 Загальні відомості з теорії

5.1.1 Механізм і кінетика процесу кристалізації

Перехід металу з рідкого стану у твердий з утворенням кристалічної структури називається первинною кристалізацією.

Вторинна кристалізація полягає в утворенні нової фази у твердому стані.

Процес кристалізації складається з двох процесів, які відбуваються одночасно: зародження та ріст кристалів. Як показано на рис.5.1 зародки, які виникають у рідині, ростуть вільно до їх зіткнення одного з одним. В результаті утворюється багато зерен, які хаотично орієнтовані. За певних умов та упорядкованому ріст зародків можливо виникнення направленої орієнтації зерен, яку називають *текстурою*.

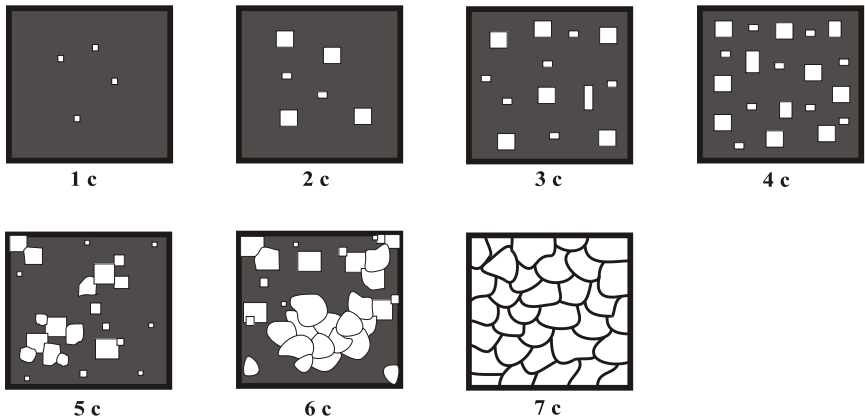


Рисунок 5.1 – Схема кристалізації

Кристали можуть зароджуватися самодовільно або утворюватися на готових центрах кристалізації.

Самодовільна (гомогенна) кристалізація проходить в ідеальних умовах в очищеній від домішок рідині, що не торкається стінок виливниці. Утворення кристалічної структури визначається загальним принципом термодинаміки: найбільш стійка та фаза, яка має мінімальне значення вільної енергії в умовах рівноваги. Вільна енергія може бути визначена як

$$F = E - TS,$$

де F – вільна енергія;

E – повна внутрішня енергія системи;

T – абсолютна температура;

S – ентропія;

TS – зв'язана енергія, що змінюється разом з температурою.

При змінюванні температури можуть відбуватися фазові перетворення, які приводять до зменшення загального запасу вільної енергії (рис. 5.2).

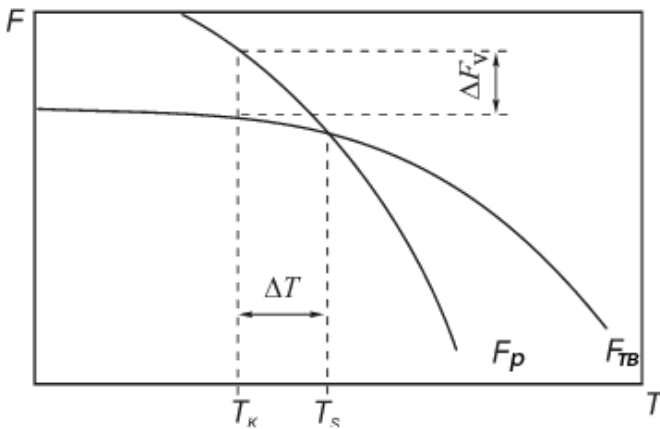


Рисунок 5.2 – Залежність питомої вільної енергії рідкої та твердої фаз від температури

Температура, при якій вільні енергії обох фаз рівні ($F_p = F_{тв}$), називається рівноважною температурою кристалізації T_c . За цієї температури обидві фази можуть співіснувати нескінченно довго. Процес кристалізації може починатися тільки при деякому переохолодженні рідкої фази до температури T_k . Цю температуру називають реальною температурою кристалізації. Різниця між

рівноважною та реальною температурою кристалізації називається ступенем переохолодження:

$$T = T_S - T_K.$$

Рушійною силою процесу кристалізації є від’ємна різниця вільних енергій твердої та рідкої фаз, що віднесена до одиниці об’єму:

$$F_V = (F_{TB} - F_{Ж}) < 0.$$

Із підвищенням ступеня переохолодження величина рушійної сили за модулем $|\Delta F_V|$ збільшується та відбувається утворення нової стабільної фази, яка характеризується найбільш низьким запасом вільної енергії.

У рідині завжди є групи атомів невеликого об’єму, у межах яких розташування атомів в більшості аналогічне їх розташуванню у ґратці кристала (що називають “близький” порядок на відміну від “далекого” порядку для твердого стану). Ці групи нестійкі, вони можуть розчинятися у рідині і знову з’являтися. При переохолодженні рідини деякі з них стають стійкими та здатними до росту, тобто утворюються зародки. Утворенню таких зародків сприяють флуктуації енергії – відхилення енергії груп атомів у відокремлених зонах від деякого середнього значення. З підвищенням ступеня переохолодження розмір флуктуаційного зародка збільшується, тому що утворення поверхні поділу відбувається не тільки в результаті теплових флуктуацій, але і за рахунок енергії, що виділяється при фазовому переході рідкої фази у тверду.

Зародки, що виникають у процесі кристалізації, можуть бути різної величини; їх ріст можливий тільки за умов досягнення ними певної величини, починаючи з якої збільшення їх розміру веде до зменшення вільної енергії. Мінімальний розмір зародка $r_{крит}$, здатного до росту при даних температурних умовах, називають *критичним розміром* зародка, а сам зародок – *критичним*, або *рівноважним*. У випадку, коли $r > r_{крит}$, енергія ΔF зменшується, утворюється стабільний зародок, який здатний до подальшого росту. Із зниженням температури критичний розмір $r_{крит}$ зменшується і з’являється більша кількість зародків, що здатні до росту.

Якщо кристалізується чистий метал, відвід теплоти при охолодженні компенсується теплотою, яка виділяється при кристалізації. Тому на кривих охолодження, які зображують у

координатах “температура – час”, процесу кристалізації відповідають температурні зупинки.

При великому об’ємі рідкого металу, теплота, що виділяється при кристалізації, підвищує температуру практично до рівноважної (рис. 5.3 – крива “а”), при малому об’ємі – теплоти недостатньо і кристалізація відбувається із значним переохолодженням (рис. 5.3 – крива “б”).

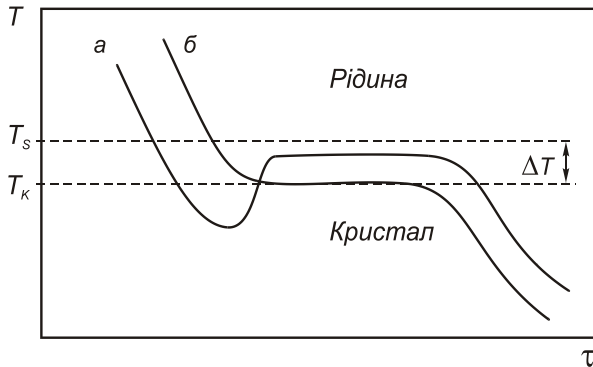


Рисунок 5.3 – Криві охолодження металу

Ступінь переохолодження залежить від природи металу. Він збільшується з підвищенням чистоти металу і ростом швидкості охолодження.

Швидкість процесу та кінцевий розмір кристалів під час твердіння визначаються співвідношенням двох основних параметрів кристалізації – *швидкості утворення зародків* V_z (тобто кількості зародків, що виникають в одиницю часу в одиниці об’єму, $1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$) та *лінійної швидкості їх росту* V_r (тобто швидкості збільшення лінійних розмірів зростаючого кристалу в одиницю часу, см/с). Ці процеси пов’язані з переміщенням атомів в залежності від температури (рис. 5.4).

Коли $\Delta T = 0$, швидкість утворення зародків та їх ріст також дорівнюють нулю, тобто кристалізація не відбувається. При малому ΔT формується велике зерно. При збільшенні ΔT швидкість утворення зародків зростає більш інтенсивно ніж швидкість їх росту, тому утворюються більш дрібні зерна.

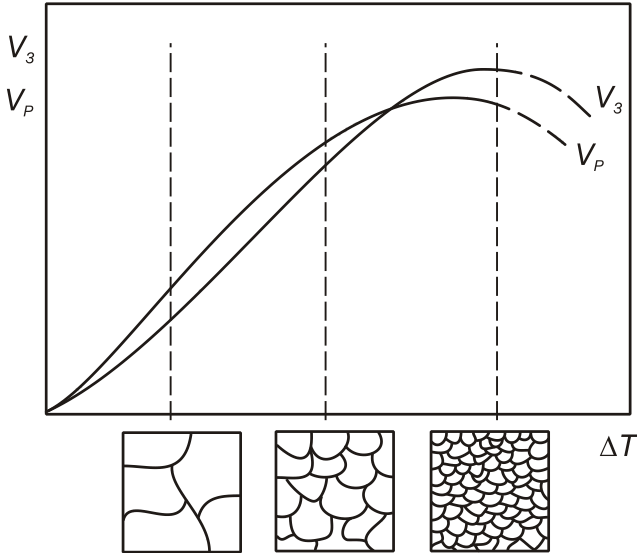


Рисунок 5.4 – Вплив ступеня переохолодження на швидкість утворення зародків – V_3 та їх ріст – V_P , а також на розмір зерна (для металів в звичайних умовах реалізуються лише висхідні швидкості V_3 їх V_P)

Гетерогенна (несамодовільна) кристалізація. В реальних умовах процес кристалізації та структура, що утворюється при цьому, мало залежать від ΔT ; переважно залежать від готових центрів кристалізації: тугоплавких частинок; неметалевих краплень; хімічних сполук; стінок форми, що виконують роль підкладок та знижують енергію, необхідну для утворення зародка.

Наявність готових центрів кристалізації обумовлює зменшення розміру кристалів при твердінні. Особливо подрібнення структури спостерігається при наявності структурного (тип ґратки) та розмірного співвідношення (розходження в міжатомних розмірах не повинно перевищувати 5-7%).

У рідкому металі можуть знаходитись поверхнево-активні домішки, які також викликають подрібнення структури. Ці домішки, що адсорбуються на поверхні кристалічного зародка, знижують поверхневий натяг на межі поділу “рідина - тверда фаза”, а також лінійну швидкість росту кристалів, що сприяє в свою чергу зменшенню $r_{\text{крит}}$ та появи нових зародків, здатних до росту.

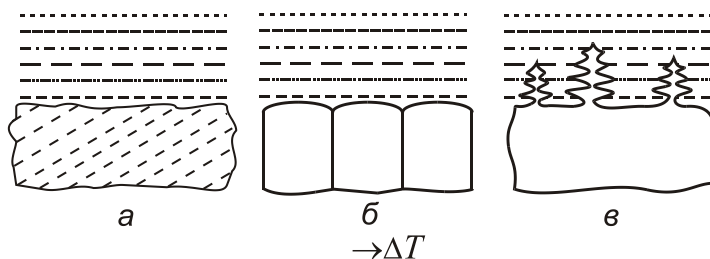
Модифікування – це технологічна операція подрібнення структури, яка полягає у введенні у рідкий сплав спеціальних добавок – модифікаторів, що утворюють додаткові центри кристалізації. Як модифікатори використовують елементи, що утворюють тугоплавкі тонкодисперсні частинки (оксиди та нітриди), або поверхнево-активні речовини (бор, ітрій, лантан, церій).

5.1.2 Форма кристалів та будова зливків

Форма кристалів, що утворюються, залежить від природи металу та умов кристалізації.

При невеликому переохолодженні та незначній кількості домішок в умовах, близьких до рівноваги, утворюються правильні кристали рівновісної поліедричної форми. Вони ростуть повільно, мають гладку поверхню з деякими сходишками, які потрібні для будування граней (рис. 5.5, а). В таких умовах ріст відбувається швидше в напрямку, перпендикулярному до менш щільнопакованих граней, внаслідок чого вони поступово заростають і кристали огранюються площинами з найбільш щільним пакуванням атомів і мінімальною поверхневою енергією.

При збільшенні переохолодження та наявності домішок на поверхні виникає комірчаста структура (рис. 5.5, б). Якщо атоми домішок мало розчиняються в ґратці кристала, вони нагромаджуються поперед фронту кристалізації, а потім попадають на межі комірок.



а – поверхня відносно гладка;

б – комірчаста структура;

в – дендритна структура

Рисунок 5.5 – Поверхня поділу кристалів у рідині, що отримана при різних швидкостях охолодження

При великих ступенях переохолодження з'являються дендритні кристали, які проростають вглиб рідини, залишаючи між собою частину розплаву, що не закристалізувалася (рис. 5.5, в). Внаслідок цього виростають довгі гілки (осі першого порядку κ), на яких з'являються і ростуть гілки другого порядку m , від них відгалужуються осі третього порядку (рис. 5.6). Дендритна форма кристалів є результатом анізотропії їх росту та напрямком відведення тепла при кристалізації.

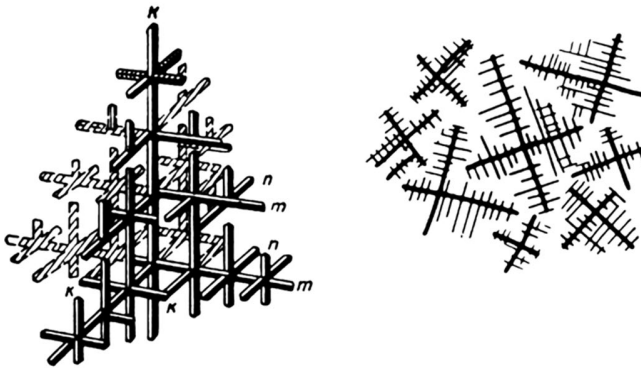


Рисунок 5.6 – Схема росту дендриту (за Черновим Д.К.)

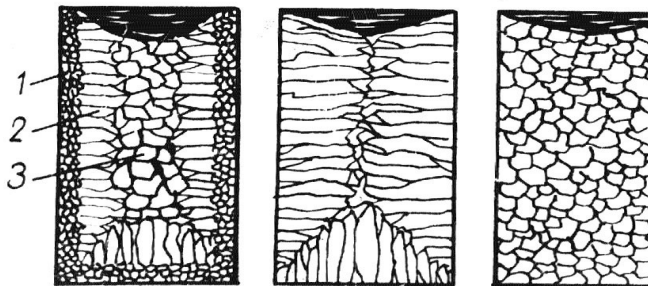
Дендрити ростуть до зіткнення одного з іншим. Після цього остаточно заповнюються проміжки між осями і дендрити перетворюються у кристали з неправильною зовнішньою поверхнею. Їх називають кристалітами або зернами. Найчастіше за все правильна форма дендритів спотворюється внаслідок зіткнення вже твердих ділянок на більш пізніх стадіях кристалізації.

Умови відводу теплоти при кристалізації впливають на форму зерен, оскільки кристали ростуть переважно у напрямку, зворотному відводу теплоти. Тому при кристалізації можуть утворюватися стовпчасті або рівновісні зерна. Будова зливка залежить від чистоти металу, наявності легувальних елементів, температури лиття, швидкості охолодження, конфігурації та форми виливниці.

Типова структура зливка складається з трьох зон (рис. 5.7, а).

Перегрівання сплавів перед литтям та швидке охолодження під час кристалізації формує структуру, яка складається з одних

стовпчастих кристалів (рис. 5.7, б). Така структура називається транскристалітною. Вона відрізняється високою щільністю металу у зоні стовпчастих кристалів, тому що тут мало газових пухирів та раковин. Проте на ділянках стику стовпчастих кристалів метал має меншу міцність. Транскристалітна структура утворюється у зварних швах, що обумовлює зменшення міцності зварних з'єднань.



а б в
 1 – зона дрібнокристалічних зерен;
 2 – стовпчасті зерна;
 3 – зона рівновісних зерен

Рисунок 5.7 – Схема можливих макроструктур зливків

При низьких температурах лиття та дуже повільному рівномірному охолодженні зона стовпчастих кристалів може бути відсутня. У структурі зливка спостерігаються лише рівновісні зерна (рис. 5.7, в).

5.2 Завдання на підготовку лабораторної роботи

Особливу увагу приділити вивченню теоретичних питань процесу кристалізації. Знати як впливають умови кристалізації на структуру та властивості сплавів.

5.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Яку структуру має метал у рідкому стані ?
2. Рушійна сила процесу кристалізації.
3. Основні параметри кристалізації та їх вплив на розмір зерна.

4. Що таке критичний зародок і від чого залежить його розмір?
5. Як відбувається гомогенна та гетерогенна кристалізація?
6. В чому полягає закон структурного та розмірного співвідношення і як він впливає на утворення зародків?
7. Що таке модифікування та його призначення.
8. Коли утворюється дендритна структура?

5.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Робота виконується при дослідженні кристалізації водних розчинів хлористого амонію, алюмінієвого галуноу та солі NaCl за допомогою біологічних мікроскопів.

5.5 Вказівки з техніки безпеки

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

5.6 Порядок виконання роботи

1. На прикладі кристалізації водних розчинів солі хлористого амонію NH_4Cl та солі NaCl, алюмінієвого галуноу простежити як відбувається процес кристалізації з використанням біологічного мікроскопа.

2. Вивчити макрошліфи литого металу, що отримані при різних умовах кристалізації.

5.7 Зміст звіту

1. Стисло описати основні питання теорії кристалізації та вплив різних факторів на будову та структуру литого металу.

2. Зарисувати структуру на послідовних етапах кристалізації солей хлористого амонію NH_4Cl , NaCl та алюмінієвого галуноу.

3. Зарисувати та описати структуру зразків литого металу з відмінними умовами кристалізації.

5.8 Література

[1] с 35-52, [4] с. 38-4; [5] с. 42-55.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ВПЛИВ ХОЛОДНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ

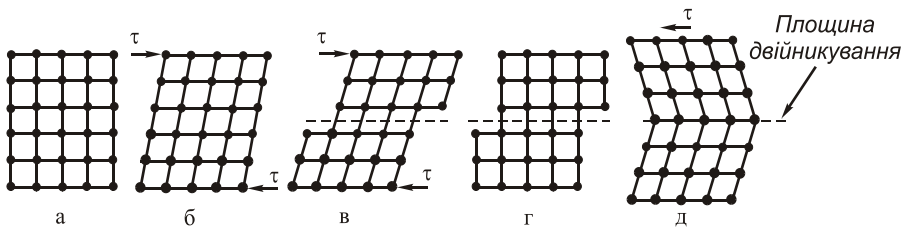
Мета роботи: вивчити вплив холодної пластичної деформації та подальшого нагрівання на твердість і структуру сталі 08кп (0,05 – 0,11%С) та 08Х18Т1 ($\leq 0,08\%C$, 17-19%Cr, 0,6-1,0%Ti).

6.1 Загальні відомості з теорії

Властивість багатьох металів та сплавів – їх здатність деформуватися під дією зовнішніх сил, використовують для отримання готових виробів та напівфабрикатів при прокатці, куванні, волочінні або штампуванні.

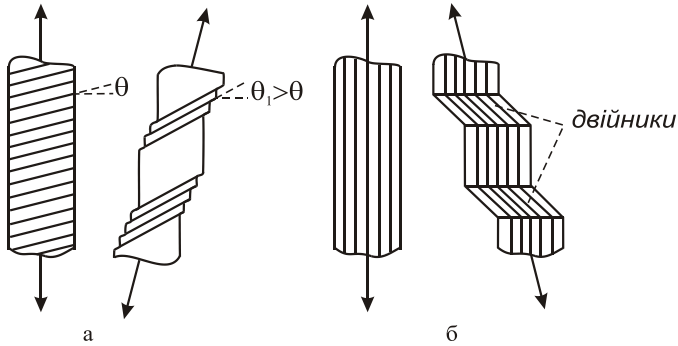
6.1.1 Пружна та пластична деформації

Під дією напружень, величина яких менше границі пружності, в металах виникає пружна деформація. Якщо навантажити метал вище границі пружності, виникає пластична залишкова деформація. При знятті навантаження первинна форма та розміри зразка не відновлюються, тому що відбувається незворотний зсув одних частин кристала відносно інших (рис. 6.1).



а – вихідний стан;
б – пружна деформація;
в, г – пластична деформація ковзанням;
д – двійниковання
Рисунок 6.1 – Схема деформування металу

Пластична деформація здійснюється ковзанням та двійникованням (рис. 6.1, 6.2).

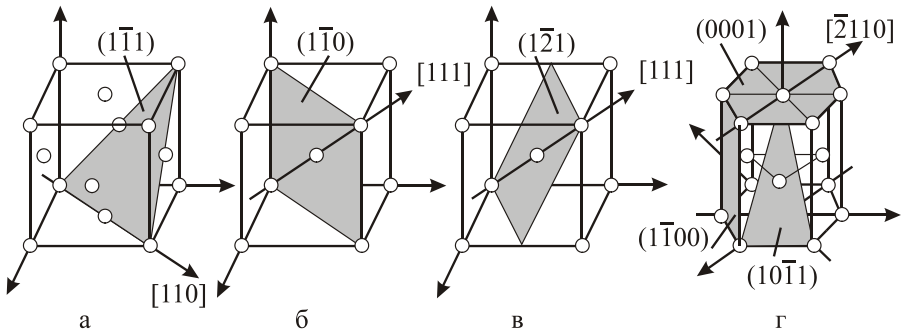


а – ковзання;

б – двійникування

Рисунок 6.2 – Схеми пластичної деформації

Ковзання – основний вид зсуву в металах, відбувається під дією дотичних напружень, коли їх значення перевищують критичні $\tau_{кр}$, по площинам та напрямкам з максимальною щільністю пакування атомів. Площини ковзання разом з напрямками ковзання, що розташовуються у цих площинах, утворюють систему ковзання (рис. 6.3).



а – ГЦК; б, в – ОЦК; г – ГЦП

Рисунок 6.3 – Системи ковзання в ґратках

Для металів з ГЦК-ґраткою (γ -Fe, Ni, Al, Cu та інші) – це система $(111) [\bar{1}10]$; з ОЦК- ґраткою (α -Fe, Cr, W, Mo, β -Ti та інші) – це системи $(1\bar{1}0) [111]$; $(1\bar{2}1) [111]$; $(1\bar{2}3) [111]$; для металів з ГЦП-ґраткою, що мають відношення параметрів $a/c \geq 1,633$ (Mg, Zn, Cd, Re)

— це система $(0001) [11\bar{2}0]$; якщо $a/c \leq 1,633$ (α -Ti, α -Zr, α -Be та інші)
 — це системи $(0001) [11\bar{2}0]$; $(10\bar{1}0) [11\bar{2}0]$; $(1110) [11\bar{2}0]$. Метали з ГЦП-граткою, у яких систем ковзання менше, мають меншу пластичність і важче деформуються.

Двійникування відбувається тоді, коли ускладнено ковзання, особливо при низьких температурах та високих швидкостях деформування. Під дією певних напружень частина кристала перебудовується в положення, дзеркально симетричне відносно площини двійникування (рис.6.1, д). Пластична деформація при цьому значно менша, ніж при ковзанні.

В реальних кристалах дотичні напруження, необхідні для зсуву в 100-1000 разів менші від розрахункових (теоретичних), що зумовлено присутністю великої кількості дислокацій, які полегшують зсув. Дислокації переміщуються ковзанням та переповзанням.

Ковзання здійснюється поступовим переміщенням крайової дислокації. Крайова дислокація ($\perp$) — це лінійний дефект кристалічної будови, що викликає спотворення ґратки навколо краю “надлишкової” напівплощини, яку називають екстраплощиною (рис. 6.4).

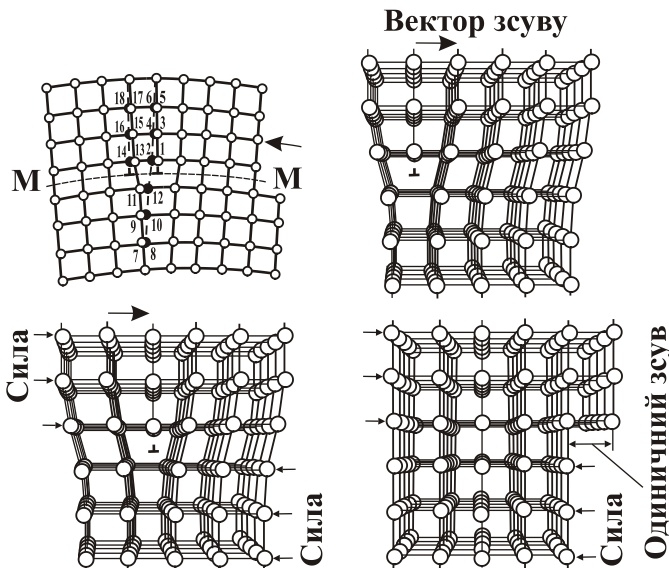


Рисунок 6.4 – Схема переміщення крайової дислокації при ковзанні

Під дією дотичного напруження напівплощина у верхній частині кристала об'єднується в одну атомну площину з сусідньою атомною площиною, що розташована нижче площини ковзання і так дислокація поступово переміщується на поверхню кристала, де утворюється сходинка. Зі збільшенням деформації ковзання поширюється на інші системи і виникає множинність ковзання у площинах, що перетинаються. Внаслідок цього виникають нові дислокації. Їх утворення пояснюється дією джерела Франка-Ріда. Під дією дотичних напружень закріплена дислокація вигинається у вигляді півкола (рис. 6.5). З цього моменту вигнута дислокація розповсюджується у вигляді двох петель.

Коли петлі стикаються, дислокації різних знаків анігілюють і дислокація розділяється на дві: замкнену петлю та відрізок, який займає положення вихідної дислокації. Замкнена петля розповсюджується до зустрічі з перешкодою. Цикл повторюється багаторазово під дією навантаження.

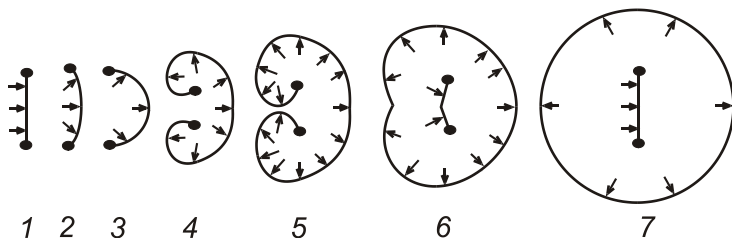


Рисунок 6.5 – Послідовність утворення нової дислокації при дії джерела Франка-Ріда

Наявність дислокацій зменшує рівень дотичних напружень, необхідних для зсуву, за рахунок реалізації естафетного механізму розриву та відновлення міжатомних зв'язків.

При великій кількості дислокацій можливе їх перетинання, утворення порогів, що зменшує рухомість та потребує для їх переміщення більших напружень, що приводить до зміцнення металів.

Загальна довжина всіх дислокаційних ліній l в одиниці об'єму V

$\sum_{i=1}^n \ell$
 $(\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \ell}{V}, \text{ см}^{-2})$ – визначається як густина дислокацій.

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

Переповзання – дифузійне зміщення дислокацій у паралельні площини ковзання внаслідок приєднання вакансій до краю екстраплощини, що відповідає переміщенню дислокації вгору.

6.1.2 Структура та властивості холоднодеформованих металів

В полікристалічних металах зерна деформуються неоднаково внаслідок їх різного орієнтування по відношенню до навантаження. Спочатку деформуються тільки ті зерна, у яких площини легкого ковзання більш сприятливо розташовані відносно напрямку діючого навантаження (під кутом 45°). На мікрошліфах при цьому можна спостерігати сліди ковзання у вигляді паралельних ліній ковзання (рис. 6.6).

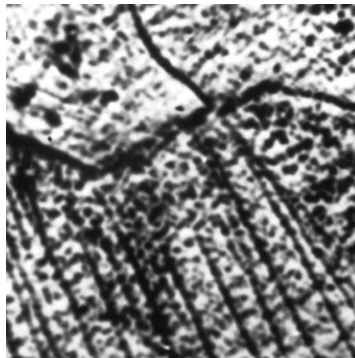


Рисунок 6.6 – Лінії ковзання у зерні аустеніту. Деформація 2,0 %

З ростом ступеня деформації зменшується дезорієнтація зерен, змінюється їх форма – вони витягуються у напрямку діючої сили. При деформації більш ніж 40% у металі виникає кристалографічна орієнтація зерен, яку називають *текстурою деформації*. В цьому

випадку більшість зерен зорієнтовані певним кристалографічним напрямком відносно зовнішніх діючих сил (наприклад, за напрямком прокатки або волочіння). Текстура приводить до анізотропії властивостей. При значних ступенях деформації утворюється волокниста структура.

Одночасно із зміною форми зерна в останньому виникає особлива комірчаста структура, яку можна спостерігати тільки при дуже великих збільшеннях в електронному мікроскопі. Розмір комірок 1-2 мкм з орієнтацією між ними $2-5^\circ$, вони розділені напівкогерентними межами із стінкою крайових дислокацій.

Передача деформації через межі зерен і комірок супроводжується ще більшим нагромадженням дислокацій, зменшенням їх рухомості. Одночасно зростають характеристики міцності (твердість, σ_B , $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{пруж.}$) та знижуються пластичність та в'язкість (δ , ψ , KCU) (рис. 6.7). Такий стан металу називають *наклепом*. В цьому проявляється єдність суперечних по своїй сутності властивостей – міцності та пластичності: міцність визначається опором руху дислокацій, а пластичність пов'язана з можливістю їх переміщення.

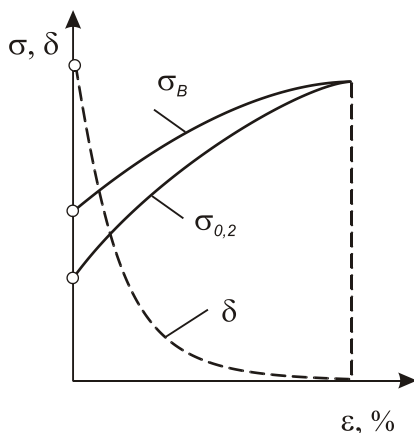


Рисунок 6.7 – Залежність механічних властивостей від ступеня деформації

Із збільшенням ступеня деформації та густини дислокацій підвищується їх взаємне гальмування.

При збільшенні ступеня деформації границя плинності $\sigma_{0,2}$ зростає швидше ніж границя міцності σ_B , у наклепаних металах зі значним ступенем деформації вони зрівнюються, а відносне видовження буде дорівнювати нулю, при подальшому деформуванні метал руйнується. Шляхом наклепу твердість і границю міцності вдається збільшити в 1,5-3 рази, а границю плинності – 5-7 раз.

Із ростом ступеня деформації підвищується електроопір, знижується магнітна проникність, густина металу та опір корозії через посилення дифузійних процесів.

Зміцнення при наклепі використовується для підвищення механічних властивостей деталей. Зниження пластичності при наклепі використовується з метою покращення обробки різанням пластичних матеріалів: латуней, сплавів алюмінію та інших.

6.1.3 Вплив нагрівання на структуру та властивості холоднодеформованого металу

Стан деформованого металу термодинамічно нестабільний. Перехід до більш стабільного стану з меншою вільною енергією відбувається при нагріванні. Процеси, що проходять при нагріванні, супроводжуються практично повним відновленням фізичних та механічних властивостей металу.

Процеси, що відбуваються при нагріванні умовно поділяють на три стадії: *відпочинок*, *полігонізація*, *рекристалізація*.

Відпочинок і полігонізацію називають *відновою*. Для цих стадій характерно лише часткове відновлення властивостей.

Відпочинок металу відбувається при низьких температурах $(0,1-0,3) \cdot T_{пл}$. Перерозподіл та зменшення кількості точкових дефектів супроводжується зниженням рівня пружних деформацій. Мікроструктура при цьому залишається незмінною при спостереженні у світловому мікроскопі.

Полігонізація розвивається при підвищенні температури нагрівання $(0,2-0,4) \cdot T_{пл}$. При цьому відбувається перерозподіл дислокацій ковзанням та переповзанням, що сприяє зменшенню їх густини. Надлишкові крайові дислокації трансформуються в малокутові межі і поділяють кожне зерно на субзерна (комірки) (рис.6.8). Виникає комірчаста полігональна структура.

Рекристалізація проходить лише після деформації, ступінь якої перевищує визначений рівень, що зветься критичним ступенем деформації $\varepsilon_{\text{крит}} \approx 2-15\%$. Якщо ступінь деформації менше критичного, тоді зародження нових зерен при нагріванні вище температури початку рекристалізації не відбувається, зерно збільшується у розмірах за рахунок міграції меж.

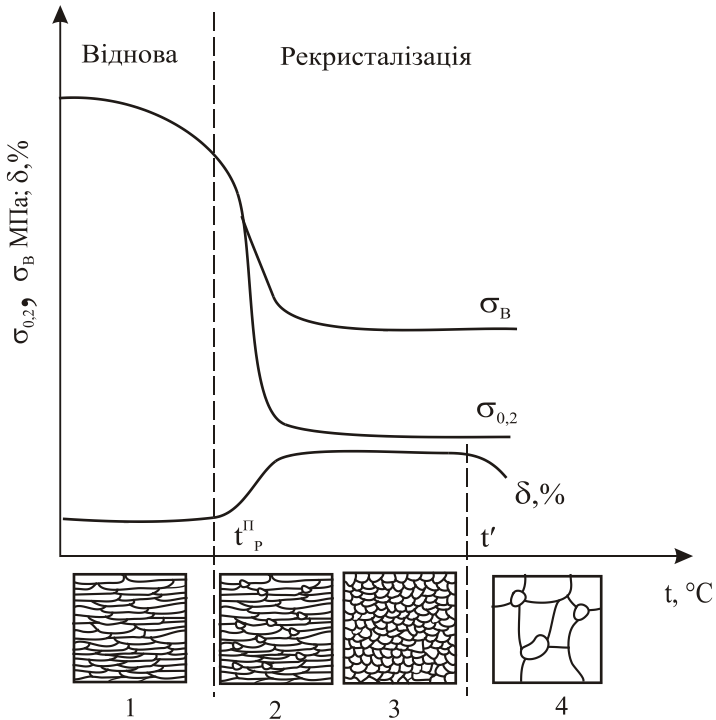


Рисунок 6.10 – Вплив нагрівання на механічні властивості та структуру наклепаного металу

Температура початку рекристалізації – це найменша температура, що забезпечує зародження нових зерен:

$$T_p^n = a \cdot T_{nl};$$

$$t, ^\circ\text{C} = a \cdot (t_{nl}, ^\circ\text{C} + 273) - 273^\circ\text{C}.$$

Коефіцієнт “a” залежить від чистоти металу та ступеня деформації, тривалості нагрівання і дорівнює $a=0,2-0,3$ – для металів

високої чистоти; $a=0,4$ – для металів технічної чистоти та $a=0,5-0,8$ – для сплавів. Значно впливають на температуру початку рекристалізації атоми домішок, легувальні елементи та дисперсні частинки в структурі.

Температурний поріг рекристалізації – це важлива технологічна характеристика, яка також залежить від чистоти матеріалу і температури плавлення; в більшості випадків її визначають як температуру напівзнеміцнення після відпалення тривалістю в одну годину та значної попередньої деформації ($\epsilon > 50 \dots 60\%$).

Для досягнення максимальної пластичності та забезпечення повноти рекристалізаційних процесів використовують *рекристалізаційне відпалення* – це вид термічної обробки, що полягає в нагріванні деформованого матеріалу до температур на $100 \dots 200^\circ\text{C}$ вище за T_p^n з наступним повільним охолодженням. Відпалення проводять з метою зниження міцності та відновлення пластичності деформованого металу, отримання визначеного розміру зерна. Таке відпалення використовують між операціями холодної прокатки, волочіння для пом'якшення структури.

Після завершення первинної рекристалізації підвищення температури викликає ріст одних рекристалізованих зерен за рахунок сусідніх, також рекристалізованих, шляхом міграції меж. Така рекристалізація називається *збиральною рекристалізацією*. Основна рушійна сила цього процесу – зменшення зерномежової енергії внаслідок скорочення довжини меж зерен. Межа переміщується в напрямку до центру її кривизни (рис. 6.9, г, д). Збільшення розмірів зерен призводить до зниження пластичності (рис. 6.10).

За певних умов після високих температур відпалення спостерігається структура, що складається з багатьох зерен однакового розміру та деякої кількості великих зерен. Такий нерівномірний, переважний ріст окремих зерен називають *вторинною рекристалізацією*.

6.1.4 Діаграми рекристалізації. Критичний ступінь деформації. Розмір зерна після рекристалізації

Розмір зерна, що утворюється внаслідок рекристалізації, залежить, переважно, від ступеня деформації та від температури рекристалізації. Залежність розміру зерен від ступеня деформації і

температури демонструють за допомогою діаграм рекристалізації (рис. 6.11). Особливість діаграми – наявність максимуму на залежності розміру зерна від ступеня деформації в області малих (2-10%) ступенів деформації $\varepsilon_{\text{крит.}}$. *Критичний ступінь деформації* – це такий мінімальний ступінь деформації, перевищення якого приводить при нагріванні до виникнення та росту зародків рекристалізованих зерен. При нагріванні безпосередньо після критичного ступеня деформації зародки рекристалізації не утворюються, а проходить лише міграція меж зерен, завдяки чому останні збільшуються.

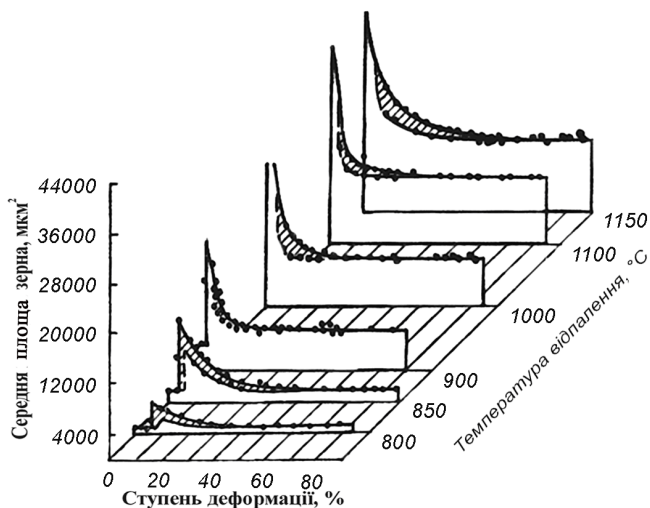


Рисунок 6.11 – Діаграма рекристалізації сталі з 0,40 %С

Критичний ступінь деформації незначний, тому зерна деформуються неоднорідно: в першу чергу ті, у яких площини найбільш легкого ковзання співпадають з напрямком дотичних напружень. Існуючих дислокацій не вистачає для утворення зародків рекристалізації. Спостереження укрупнення зерен при нагріванні зумовлено ростом деяких первісних зерен за рахунок поступового зникнення меж зерен при анігіляції дислокацій і інших дефектів. Укрупнення зерен призводить, як правило, до зниження властивостей металу, тому при обробці металів тиском критичного ступеня деформації уникають.

Після значної деформації ($\varepsilon > \varepsilon_{\text{крит}}$) швидкість появи зародків рекристалізації перевищує швидкість їх росту, що зумовлює утворення дрібних зерен. Розмір зерна залежить в основному від ступеня деформації та температури рекристалізації. Збільшення тривалості рекристалізаційного відпалення також призведе до збільшення розміру зерна, але в меншій мірі, ніж температура.

6.1.5 Холодна та гаряча деформації

Холодною називають деформацію, яку здійснюють при температурах нижчих за температуру рекристалізації.

Гаряча деформація здійснюється за температур вище T_p^n , тому одночасно здійснюються два процеси – зміцнення та знеміцнення. В цьому випадку центри первинної рекристалізації з'являються в процесі деформації, тому рекристалізацію називають динамічною. Після гарячої пластичної деформації завершується рекристалізація і метал не наклепується. Гаряча деформація збільшує густину литої сталі, що обумовлює усунення шпарин та раковин.

6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Особливу увагу приділити вивченню теоретичних питань щодо процесів, які відбуваються при пластичній деформації. Засвоїти сутність і призначення зміцнення при наклепі.

Підготувати табл. 6.1 і 6.2.

6.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Механізм пружної деформації.
2. Вказати системи ковзання для металів з ОЦК-, ГЦК- та ГЦП-гратками.
3. Типи дефектів кристалічної будови та їх вплив на властивості металів.
4. Поняття наклепу. Роль дислокацій в цьому процесі.
5. Величина густини дислокацій до та після холодної пластичної деформації.
6. Теоретична та реальна міцність металів.
7. Вплив холодної пластичної деформації на структуру та властивості металів.

8. Які процеси здійснюються в холоднодеформованому металі при нагріванні? Їх рушійні сили.

9. В чому полягає різниця між процесами полігонізації та рекристалізації?

10. Первинна рекристалізація, її відміна від збиральної рекристалізації.

11. Критичний ступінь деформації.

12. Температурний поріг рекристалізації та визначення температури рекристалізаційного відпалення.

13. Холодна та гаряча пластична деформація. Основні відмінності та особливості процесів.

6.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Роботу виконують на зразках холоднокатаних та відпалених сталей 08кп та 08Х18Т1 після деформації 5, 10, 25, 60 %.

Мікроструктуру зразків вивчають за допомогою мікроскопів МИМ-7, твердість (HRB) визначають на приладі ТК-1 методом Роквелла сталевую кулькою при навантаженні 981 (100 кгс) за шкалою В.

6.5 Вказівки з техніки безпеки

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

6.6 Порядок виконання роботи

1. Виміряти твердість і зарисувати мікроструктуру зразків. Визначити номер зерна, використовуючи шкали балів за ГОСТ 5639-85. Дані занести в таблицю 6.1.

2. Виміряти твердість зразків сталей 08кп та 08Х18Т1 після холодної пластичної деформації ($\varepsilon = 60\%$) та подальшого нагрівання при 400-800°C тривалістю одна година (табл. 6.2). Дані занести в табл. 6.2.

Таблиця 6.1 – Твердість і структура сталі 08кп після холодної деформації та подальшого рекристалізаційного відпалення

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

Таблиця 6.2 – Твердість сталі 08кп та 08X18T1 після нагрівання при різних температурах

Марка сталі	Твердість, HRB				
	Після деформації $\varepsilon=60\%$	Після нагрівання $\tau = 1$ год. при температурах, $^{\circ}\text{C}$			
		400	500	600	700
08кп					
08X18T1					

6.7 Зміст звіту

1. Стисло викласти загальні відомості щодо процесів холодної пластичної деформації та рекристалізації.

2. За даними таблиці 6.1 побудувати графік залежності твердості від різного ступеня деформації та після відпалення.

3. Накреслити графік залежності твердості від температури нагрівання для зразків сталей 08кп і 08X18T1 ($\varepsilon=60\%$) за даними табл.6.2.

4. Визначити температуру початку рекристалізації, температурний поріг рекристалізації та встановити температуру рекристалізаційного відпалення для сталей 08кп і 08X18T1.

6.8 Література

[1] с. 60-83, [3] с. 52-79; [5] с. 61-96; [4] с. 50-66, с. 74-81.