

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 0

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»

протокол від 25 липня 2022 р.
№ 11

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

**для проведення лабораторних занять
з навчальної дисципліни**

«ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБНИЦТВ ТА ОСНОВИ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА» (частина 2)

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітньо-професійна програма «Високотехнологічний комп'ютерний
інжиніринг»

факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
мехатроніки і робототехніки

кафедра механічної інженерії

Рекомендовано на засіданні
кафедри механічної інженерії
14 січня 2022 р., протокол № 1

Розробники:

старший викладач кафедри автомобілів і транспортних технологій

МОЖАРОВСЬКИЙ Микола;

к.т.н., доц., професор кафедри механічної інженерії

ВИГОВСЬКИЙ Георгій;

к.т.н., доц., доцент кафедри механічної інженерії

БАЛИЦЬКА Наталія

к.т.н., доц., доцент кафедри механічної інженерії

ШОСТАЧУК Андрій

Житомир 2022

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 1

Методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Технологічні процеси машинобудівних виробництв та основи матеріалознавства» для студентів освітнього рівня «Бакалавр» спеціальності 131 «Прикладна механіка» – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. – 100 с.

Розробники: МОЖАРОВСЬКИЙ Микола Мар'янович;
ВИГОВСЬКИЙ Георгій Миколайович;
БАЛИЦЬКА Наталія Олександрівна;
ШОСТАЧУК Андрій Миколайович

Рецензенти:

к.т.н., доцент, завідувач кафедри механічної інженерії Мельник О.Л.;
к.т.н., доцент кафедри механічної інженерії Глембоцька Л.Є.

Розглянуто і рекомендовано на засіданні кафедри механічної інженерії.
Протокол від «14» січня 2022 р. № 1

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 2

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Лабораторна робота № 1. Механічні властивості металів	4
Лабораторна робота № 2. Методи дослідження металів та сплавів	11
Лабораторна робота № 3. Макроскопічний та мікроскопічний методи дослідження металів та сплавів	20
Лабораторна робота № 4. Вплив пластичної деформації та рекристалізації на структуру і твердість сталі	30
Лабораторна робота № 5. Залізовуглецеві сплави. Мікроскопічне дослідження відпалених вуглецевих сталей	41
Лабораторна робота № 6. Мікроскопічне дослідження чавунів	57
Лабораторна робота № 7. Термічна обробка вуглецевих сталей	64
Лабораторна робота № 8. Сплави кольорових металів	82
Додаток А. Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт.....	100

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1 Арк 97 / 3	

ВСТУП

Методичні рекомендації для проведення лабораторних занять з навчальної дисципліни «Технологічні процеси машинобудівних виробництв та основи матеріалознавства» являють собою збірник теоретичних відомостей і завдань для виконання робіт.

Для виконання лабораторних робіт Вам знадобляться наступні уміння і навички:

- ✓ пошук відомостей по визначеній темі;
- ✓ вибір необхідної і достатньої інформації з одного або декількох джерел;
- ✓ розуміння як текстового так і графічного та числового способів представлення інформації;
- ✓ аналіз отриманої інформації;
- ✓ узагальнення отриманих даних;
- ✓ логічна побудова відповіді на питання, що виключає протиречиві твердження;
- ✓ використання фактичних даних для підтвердження свого висновку (наприклад, механічних характеристик матеріалів);
- ✓ розрахунок параметрів структури і механічних характеристик з використанням формул, побудови графічних залежностей за знайденими числовими даними;
- ✓ вибір режимів термічної обробки сплавів з використанням графічних і аналітичних залежностей;
- ✓ грамотне і чітке формулювання своїх думок і кінцевого висновку.

Пізнавальна цінність, самостійність роботи студентів і набуття ними навичок роботи з технічною літературою, аналізу та інтерпретації отриманої інформації роблять лабораторні роботи однією із важких частин вивчення дисципліни.

Теми лабораторних робіт відповідають всім основним розділам дисципліни. Кожне завдання виконується індивідуально або підгрупою з декількох студентів для отримання навичок колективної роботи. Перед виконанням лабораторної роботи необхідно прочитати теоретичний матеріал і засвоїти основні положення. В ході виконання роботи знадобляться додаткові відомості з навчальної і довідникової літератури. Кожен студент оформляє виконане завдання індивідуально.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 4

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

Мета роботи – вивчити стандартні механічні характеристики і основні експлуатаційні властивості металів.

Основні теоретичні відомості

Механічні властивості визначають поведінку металу під навантаженням. Характеристики механічних властивостей отримують при *механічних випробуваннях*. Для цього зразок із заданого матеріалу піддають зовнішнім навантаженням на спеціальному обладнанні і заміряють реакцію матеріалу.

Під дією різних зовнішніх сил метал деформується і руйнується. Але величиною прикладеного навантаження неможливо охарактеризувати умови навантаження. Важливо знати, на яку площу поперечного перерізу це навантаження діє.

За характеристику навантаження приймають **напруження** – відношення сили до площі перерізу, на яку вона діє:

$$\sigma = \frac{P}{F}.$$

Напруження, що діє на будь-яку довільно взяту площадку, можна розкласти на нормальну складову σ , перпендикулярну до площадки, і дотичну τ (рис. 1.1, *a*).

При однаковому навантаженні P деформація стержнів (рис. 1.1, *б*) буде різною: другий подовжиться більше, оскільки площа його поперечного перерізу є меншою.

$$\sigma_1 = \frac{P}{F_1}; \sigma_2 = \frac{P}{F_2}; \sigma_1 < \sigma_2, \text{ оскільки } F_1 > F_2.$$

Напруження в другому стержні буде більшим, а тому він отримає більшу деформацію.

Напруження, яке витримує метал, є його основною механічною характеристикою, яка не залежить від розмірів виробу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 5

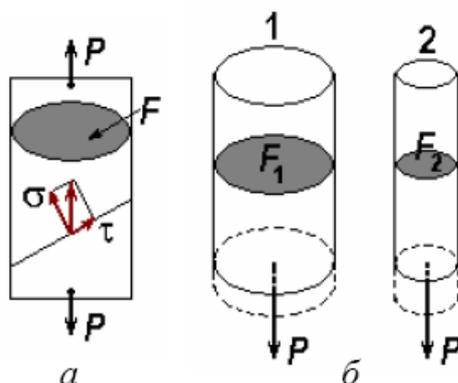


Рис. 1.1. Нормальне і дотичне напруження (а); деформація стержнів при однаковому навантаженні (б)

Міцність – це здібність металу чинити опір деформації і руйнуванню під дією зовнішніх сил і внутрішніх напружень.

Стандартами передбачено отримання характеристик міцності при випробуваннях на розтяг, стиск, згин, кручення. Все це – *статичні випробування*, з поступовим, плавним зростанням зовнішнього навантаження.

Найбільш інформативним є випробування на розтяг на розривній машині; його і проводять в більшості випадків для отримання стандартних характеристик міцності (рис. 1.2, а).

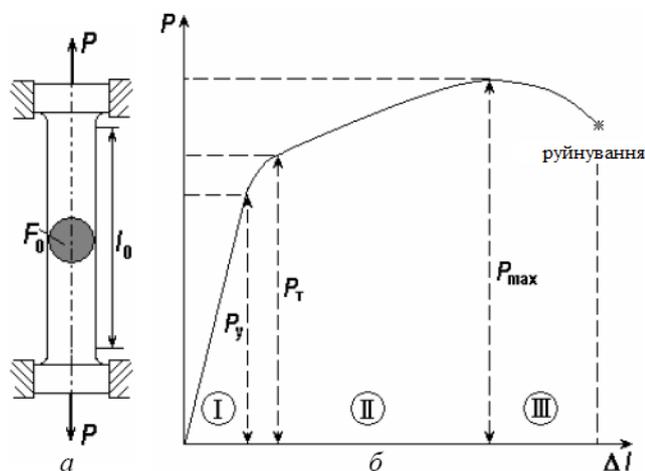


Рис. 1.2. Зразок для випробувань на розтяг і схема випробувань на розривній машині (а); діаграма розтягу пластичного металу (б)

Розривна машина обладнана пристроєм для запису так званої *діаграми розтягу* – графіка залежності між прикладеним навантаженням P і видовженням зразка Δl (рис. 1.2, б). Сучасні машини мають вихід на комп'ютер, який не тільки записує діаграму, але і розраховує характеристики міцності.

При зростанні навантаження P довжина зразка l змінюється нелінійно.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 6

На кривій розтягу можна виділити три ділянки: I – область пружної деформації, II – область пластичної деформації, III – область розвитку тріщин. Величина пружної деформації в металах невелика: менше 1 %. Пластична деформація у чистих металів може досягати десятків процентів. Саме в цій області відбувається активне ковзання дислокацій. При перевищенні навантаження P_{max} на зразку виникає місцеве звуження – *шийка*, і деформація стає зосередженою. Подальший розвиток деформації в шийці призводить до зародження тріщини і руйнуванню зразка.

З цього випробування отримують наступні характеристики міцності:
границя пружності $\sigma_{Pr} = \frac{P_{Pr}}{F_0}$ [МПа] – це найбільше напруження, після якого зразок повертається до попередніх форми і розміру;

границя текучості $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$ [МПа] – це напруження пластичної течії металу без збільшення навантаження;

границя міцності $\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}$ [МПа] – це найбільше напруження, яке витримує метал не руйнуючись.

Дійсну або фізичну границю текучості σ_T визначити важко: не у всіх металів утворюється «площадка текучості». Тому, частіше за все визначають **умовну границю текучості** $\sigma_{0.2}$, яка викликає залишкову деформацію 0,2 %: $\sigma_T \approx \sigma_{0.2}$.

Розрахунки на міцність найчастіше ведуть за границею текучості, оскільки значна пластична деформація більшості деталей і конструкцій недопустима. Але і границю міцності знати необхідно, оскільки вона показує при якому напруженні почнеться руйнування.

Пластичність – це здатність металу деформуватись без руйнування.

Характеристики пластичності визначають із того ж випробування на розтяг. Це

$$\text{відносне видовження } \delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{відносне звуження } \psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \cdot 100 [\%]$$

де l_0 і l_K , мм – довжина зразка до і після випробувань;

F_0 и F_K , мм² – початкова і кінцева площа поперечного перерізу зразка (рис. 1.2, а).

Відносне видовження і відносне звуження є одночасно і критеріями надійності: матеріал, що має більші значення δ і ψ , більш надійний.

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого, більш твердого тіла.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 7

Методи вимірювання, прилади, позначення, одиниці вимірювання твердості вивчити самостійно!

В'язкість – це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при ударних, динамічних навантаженнях.

Характеристика в'язкості визначається при випробуванні на ударний згин. Це, на відміну від віх попередніх, динамічне випробування, при якому навантаження прикладається до зразка з дуже великою швидкістю, за тисячні долі секунди.

Випробування проводять на маятниковому копрі (рис. 1.3).

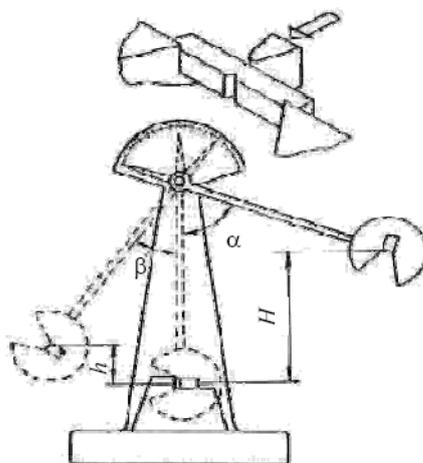


Рис. 1.3. Схема випробувань на ударний згин

Важкий маятник, піднятий на визначений кут α , відпускають. На шляху руху маятника знаходиться зразок. Удар ножа маятника руйнує його. Виконана при руйнуванні робота визначається як різниця між потенціальною енергією маятника до і після випробувань.

Ударна в'язкість – це робота руйнування зразка, віднесена до площі поперечного перерізу:

$$K_C = \frac{A_p}{F} [\text{Дж}/\text{м}^2],$$

де A_p – робота руйнування, F – площа поперечного перерізу зразка.

Зразок повинен мати надріз – концентратор напруження. Позначення ударної в'язкості залежить від виду надрізу (рис. 1.4).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 8

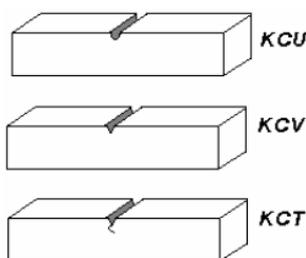


Рис. 1.4. Зразки для випробувань на ударну в'язкість

Для одного і того ж матеріалу $KCU > KCV > KCT$, тобто чим гостріший надріз, тим легше руйнується матеріал.

Ударна в'язкість також є критерієм надійності матеріалу, гарантією, що він не буде руйнуватись крихко, несподівано.

Ударна в'язкість є комплексною характеристикою, що включає питому роботу зародження тріщини a_z і питому роботу росту тріщини a_p . Для більш достовірної оцінки надійності матеріалу методом екстраполяції визначають ударну в'язкість при радіусі концентратора r , що прямує до нуля (рис. 1.5). Це і буде робота росту тріщини a_p , що дозволяє оцінити надійність (зародки тріщин в матеріалі є майже завжди, питання в тому, чи будуть вони рости).

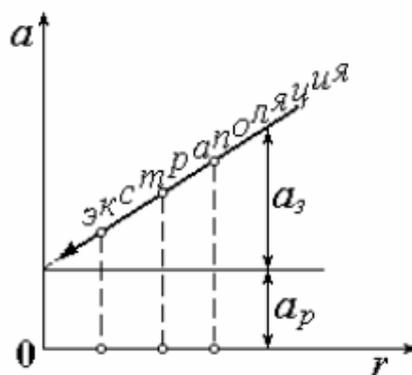


Рис. 1.5. Визначення роботи зародження тріщини

Деякі експлуатаційні властивості

В умовах експлуатації властивості матеріалів можуть не відповідати стандартним, що наводяться в довідниках, значенням. В різних агресивних середовищах, при дії високих або низьких температур матеріали проявляють значно меншу міцність і довговічність, ніж при нормальних умовах.

1) Холодноламкість

При низьких температурах (від 0 до -269 °С, температури рідкого гелію) збільшується схильність металу до крихкого руйнування. При цьому різко знижується ударна в'язкість (KCU , KCT) і змінюється будова зламу – від волокнистого, матового до кристалічного, блискучого.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 9

Властивість металу крихко руйнуватись, втратити в'язкість при пониженні температури називається **холодноламкістю**.

За характеристику холодноламкості приймають **температурний поріг холодноламкості** t_{50} . Це температура, при якій величина ударної в'язкості зменшується вдвічі (рис. 1.6). При цьому злам має будову наполовину в'язку, наполовину крихку.

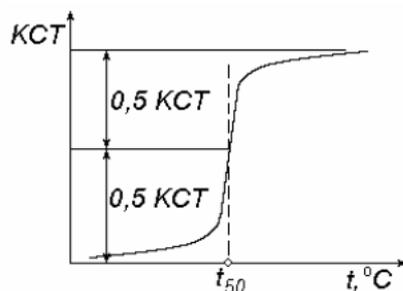


Рис. 1.6. Визначення порогу холодноламкості

2) Витривалість

Багато деталей – вали, вісі, шестерні по-різному чинять опір змінним за величиною і напрямком навантаженням. Під дією знакозмінних навантажень, що багатократно повторюються, в металі накопичуються пошкодження, дефекти. Це явище називають **втомою**.

В таких умовах роботи напруження, менші σ_B і навіть σ_T , можуть викликати зародження і ріст **тріщини втоми**. Зазвичай вона виникає на поверхні деталі в місцях концентраторів напружень і потім підростає з кожним циклом навантаження. Це поступово приводить до руйнування.

Витривалість – це здатність металу протистояти втомі, чинити опір руйнуванню при знакозмінних навантаженнях.

Характеристики витривалості визначають в результаті проведення випробувань на спеціальних машинах циклічної дії. Навантаження, що діють на кожну точку поперечного перерізу зразка, безперервно змінюються за величиною і напрямком (рис. 1.7).

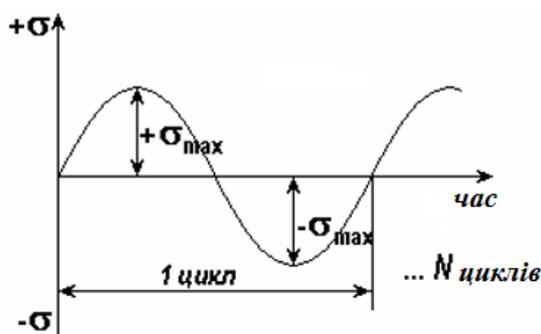


Рис. 1.7. Схема циклічного навантаження при випробуваннях на втому

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 10

Границею витривалості, або **границею втоми** σ_{-1} називається найбільше напруження, яке не викликає руйнування зразка після заданого числа циклів навантаження.

При випробуванні сталей стандартне число циклів навантаження $N = 10^7$, при випробуванні кольорових металів і сплавів $N = 10^8$.

Контрольні питання:

1. При якому напруженні деформація металу протікає без збільшення навантаження?
2. Дайте визначення характеристиці пластичності ψ .
3. Якими характеристиками оцінюють міцність металу?
4. Що таке в'язкість?
5. Що називають границею витривалості матеріалу?

Література:

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Потітехніка», 2001. – с. 60-84.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 67-68.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение: методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю. Геллер, А. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1983. – с. 29-42.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 11

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

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

2.1. Загальні теоретичні відомості

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

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

2.1.1. Термічний метод

Термічний метод застосовують для визначення температур фазових перетворень в металах та побудови діаграм стану сплавів. На рис. 2.1 показано схему устаткування для проведення термічного аналізу. Термопара - це спаяні разом дроти двох різних металів або сплавів. Якщо нагріти спай термопари, то виникає термоелектрорушійна сила (ТЕРС), під дією якої струм відхиляє стрілку гальванометра. Від різниці між температурою гарячого та холодних кінців термопари залежить ТЕРС, абсолютне значення якої дозволяє визначити температуру сплаву. Сплав нагрівають до рідкого стану, а потім повільно охолоджують та фіксують температуру через кожні 20...30 с. Використовуючи ці дані, будують криві охолодження (або нагрівання) в координатах “температура-час” (рис. 2.2, а).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 12

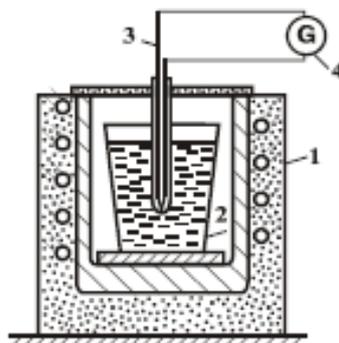


Рис. 2.1. Схема установки для термічного аналізу:
1 – електропіч; 2 – тигель із металом; 3 – термопара; 4 – гальванометр

Фазові перетворення - плавлення (або кристалізація), зміна кристалічної ґратки, розчинення (або кристалізація) надлишкових фаз супроводжуються виділенням чи поглинанням тепла. Внаслідок цього на кривих охолодження спостерігаються температурні зупинки, коли перетворення відбувається при постійній температурі, або перегини, якщо перетворення здійснюється в інтервалі температур (рис. 2.2). Наприклад, на кривих охолодження умовний чистий метал А кристалізується при температурі t_A , сплав I (38%B+62%A) – в інтервалі температур $t_3 \dots t_1$, сплав II – в інтервалі $t_4 \dots t_2$. Ці температурні точки називають критичними.

Критичні точки використовують для побудови діаграми стану сплавів у координатах “температура – хімічний склад сплавів”. Діаграма стану – це графічні зони стійкого існування фаз у залежності від хімічного складу сплавів та температури. Для побудови діаграми визначають критичні точки для цілого ряду сплавів, наносять їх в зазначеній системі координат і з’єднують плавними лініями (рис. 2.2, б). Лінії відокремлюють зони із різними фазами, точки ліній характеризують хімічний склад фаз, що знаходяться в рівновазі; температури початку та кінця фазових перетворень. Діаграми стану є рівноважними і відповідні структури можна одержати лише при повільному охолодженні сплавів. Знання діаграми необхідне для визначення фазового складу сплаву, вибору режимів термічної обробки та температур технологічних процесів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 13

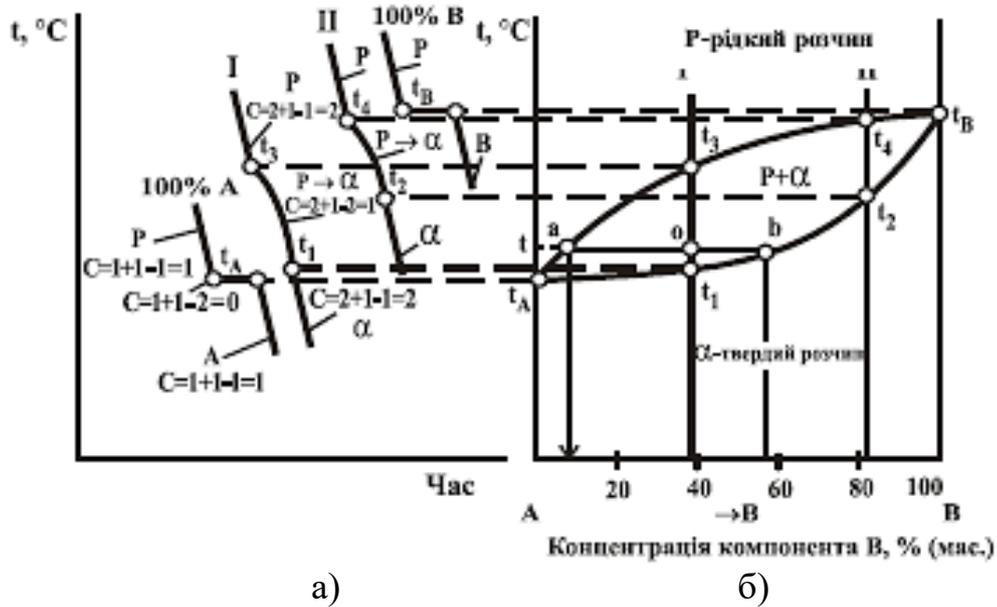


Рис. 2.2. Побудова діаграми стану за допомогою кривих охолодження:
а – криві охолодження; б – діаграма стану умовних металів А та В

2.1.2. Дилатометричний метод

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

За допомогою дилатометра записують дилатометричну криву, що показує зміну подовження зразка у залежності від температури (рис. 2.3) або в процесі ізотермічної витримки. Якщо у сплаві відсутні фазові перетворення, то довжина зразка змінюється монотонно (рис. 2.3, інтервал температур 20...911°C). При температурі 911°C (точка A_{c3}) довжина зразка значно зменшується, оскільки ОЦК гратка Fe_{α} перетворюється в більш компактну ГЦК гратку Fe_{γ} .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 14

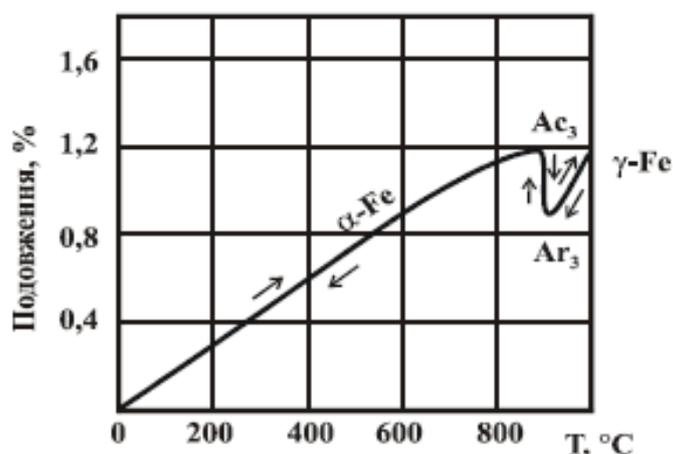


Рис. 2.3. Дилатометрична крива для чистого заліза

Подальше нагрівання приводить до збільшення довжини зразка зі структурою Fe_γ внаслідок теплового розширення.

Найчастіше використовують диференційні дилатометри (рис. 2.4), за допомогою яких фіксується різниця подовжень зразка та еталона (сплаву з відомим коефіцієнтом лінійного термічного розширення). Зразок **1** та еталон **2** припаяні з одного кінця кварцових трубок **3** та **4**. За допомогою кварцових стрижнів (**6** та **7**) подовження зразка та еталона передаються через металеві стрижні **8** рухомим опорам **10** та **11** трикутника, на якому розміщене дзеркало **5**; третя опора нерухома.

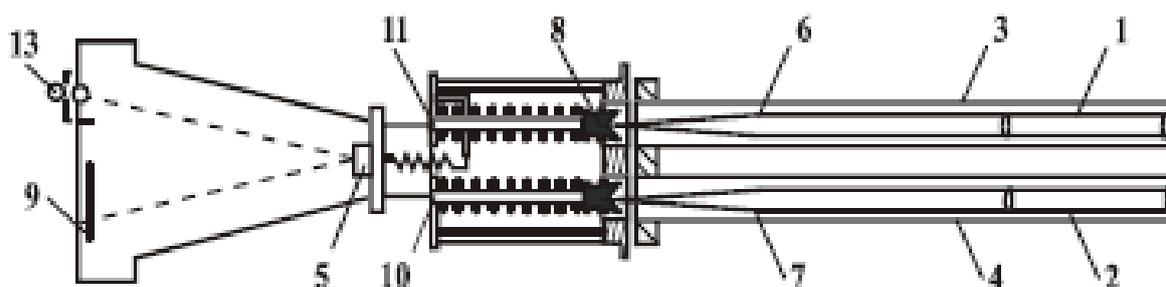


Рис. 2.4. Схема диференційного дилатометра

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 15

2.1.3. Метод електронної мікроскопії

Метод електронної мікроскопії дозволяє вивчати тонку структуру металів та сплавів при збільшеннях до 500 тис. разів і більше та одержувати більш повні знання про механізми фазових перетворень, пластичної деформації та руйнування металів, вивчати дефекти кристалічної будови. В електронному мікроскопі використовують електронні промені та систему електромагнітних лінз. Мікроскоп складається із герметичної колони, в якій досягається високий вакуум (до $1,3 \times 10^{-5}$ Па) і розташована електронна оптика та блоки живлення. На рис. 2.5 показана схема електронного мікроскопа для просвічування. Випромінювач електронів складається з катода **1**, фокусуючого електрода **2** та анода **3**. Конденсорна лінза **4** фокусує електронні промені на об'єкті **5**. Об'єктивна лінза **6** дає збільшене проміжне зображення в площині селекторної діафрагми **7**. Проміжна лінза **8** передає центральну ділянку зображення на предметну площину проекційної лінзи **9**, яка формує кінцеве зображення на екрані або фотопластинці **10**. Об'єктивна та проекційна лінзи збільшують зображення приблизно у сто разів кожна.

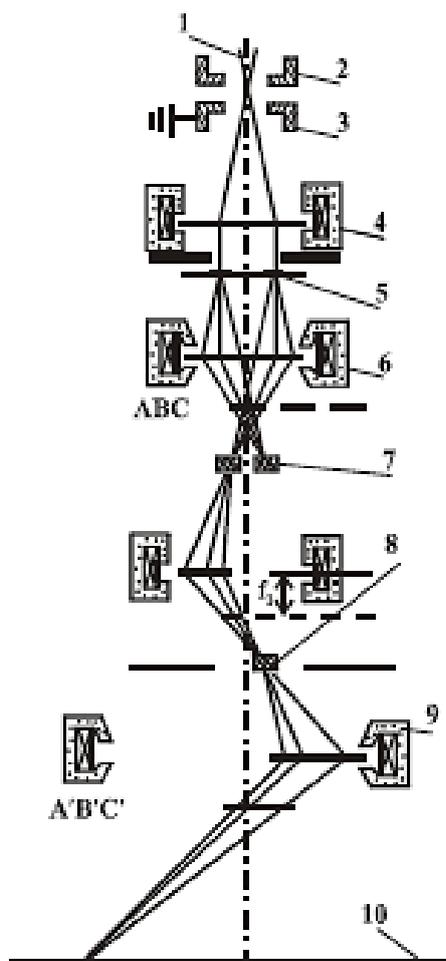


Рис. 2.5. Схема електронного мікроскопа

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 16

Загальне збільшення мікроскопа (приблизно до $\times 10^6$ разів) визначається фокусною відстанню електромагнітних лінз і регулюється величиною струму в їх обмотках. Прискорювальна напруга до 100 кВ, розділяюча здатність (найменша частинка, яку можна роздивитись – 0,2 нм, товщина фольги для просвічування не більш, ніж 10 нм. Таку фольгу виготовляють з більш товстої пластини при електролітичному травленні в спеціальних розчинах. При проходженні електронів через фольгу контраст зображення виникає внаслідок розсіяння електронів на атомах, що зміщені із нормального положення в області дефекту (границі зерен, дислокації та інші дефекти кристалічної будови).

Непрямим методом за допомогою реплік можна вивчати поверхню масивних зразків. Репліка – це плівка (лакова, вугільна, оксидна тощо), яку наносять на поверхню зразка, а потім відділяють від зразка і досліджують. Репліка передає рельєф поверхні, в ній знаходяться частинки надлишкових фаз, склад котрих можна визначити. В останні роки широке розповсюдження знайшли растрові електронні мікроскопи, що дозволяють безпосередньо вивчати рельєф зламів, мікроструктуру та хімічний склад зразка без виготовлення реплік або фольг.

2.1.4. Рентгенографічні методи дослідження

В залежності від характеру використання рентгенівських променів всі методи розподіляють на рентгеноструктурний, рентгеноспектральний аналізи та рентгенівську дефектоскопію. Рентгеноструктурний аналіз заснований на дифракції, яка виникає при розсіянні променів атомами ґратки. Розшифровують дифракційні картини за допомогою рівняння Вульфа-Брега:

$$2d_{hkl}\sin\alpha = n\lambda.$$

Дифракційні максимуми спостерігаються тоді, коли промені довжиною λ , віддзеркалені від паралельних площин з відстанню між ними d_{hkl} під кутом α мають різницю ходу, що дорівнює цілій кількості довжин хвиль (довжина хвилі залежить від матеріалу анода рентгенівської трубки). Вимірюючи на рентгенограмах кути віддзеркалення α , визначають характеристику кристалічної ґратки (d_{hkl}). Дифракційна картина від монокристала характеризується закономірно розташованими точковими рефлексами. Їх число, форма та інтенсивність дають можливість визначити орієнтацію монокристала, тип та розмір кристалічної ґратки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 17

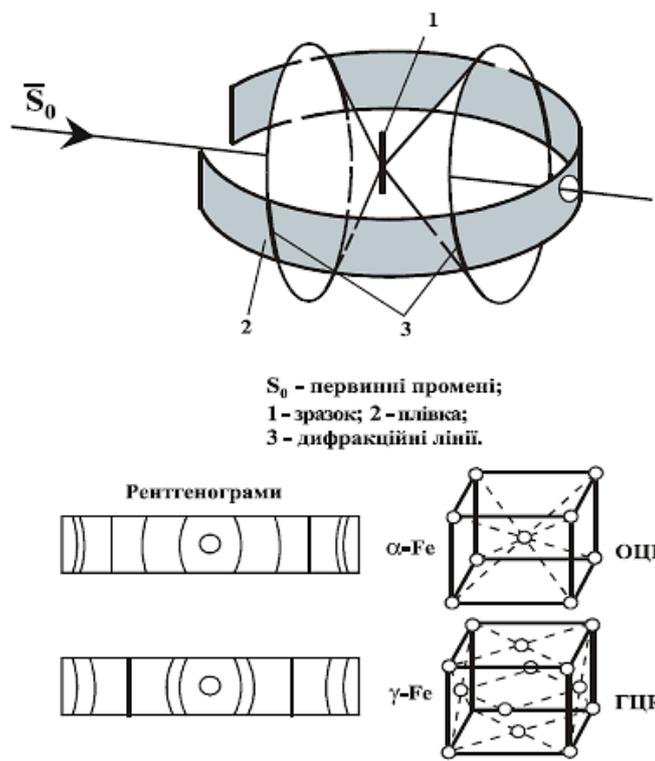


Рис. 2.6. Дифракційна картина від полікристала та схеми рентгенограм від ОЦК і ГЦК ґраток

Від полікристала дифракційні промені розповсюджуються у вигляді системи конічних поверхонь, тому в залежності від розташування плівки відносно первинних променів на рентгенограмі спостерігають кільця або лінії у вигляді відрізків дуг (рис. 2.6). Аналіз дифракційної картини і відповідні розрахунки дозволяють визначити: якісний та кількісний фазовий склад кристалічного зразка; тип і розмір кристалічної ґратки; внутрішні напруження; розпад пересичених твердих розчинів; орієнтацію зерен в текстурованих матеріалах тощо.

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

Сучасні мікроаналізатори дозволяють аналізувати у мікрооб'ємах (приблизно 3 мкм³) практично всі елементи; чутливість визначення становить 0,1...10⁻⁶ % в залежності від порядкового номера елемента та розміру електронного зонда. Ділянка для вивчення вибирається за допомогою мікроскопа, вісь якого збігається із точкою падіння електронного зонда на зразок. При переміщенні зонда можна записати зміну інтенсивності, яка відповідає концентрації елемента уздовж цього напрямку.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 18

Рентгеноспектральний аналіз здійснюється за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ).

Рентгенівська дефектоскопія ґрунтується на різній здатності рентгенівських променів поглинатися при проходженні через матеріали різної товщини та щільності. Метод має високу чутливість та універсальність, застосовується для контролю якості виробів і дозволяє виявити раковини, пустоти, шпарини, непровари зварних швів, тріщини, вкраплення тощо. Схему просвічування показано на рис. 2.7. Дефекти на плівці виявляються у вигляді більш темних або світлих плям порівняно із фоном.

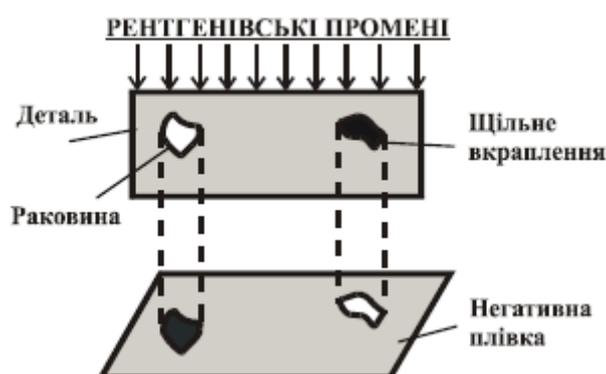


Рис. 2.7. Схема просвічування деталей

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

2.2. Завдання

Записати сутність і призначення термічного, дилатометричного, електронномікроскопічного та рентгенівських методів дослідження. Зарисувати схеми приладів та установок, що застосовуються при використанні цих методів.

2.3. Контрольні запитання

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 19

4. Приготування реплік та фольг для електронномікроскопічного аналізу.
5. Особливості рентгеноструктурного та рентгеноспектрального методів дослідження.
6. Сутність методу неруйнівного контролю якості деталей за допомогою рентгенівських променів.

2.4. Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

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

2.5. Вказівки з техніки безпеки

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

2.6. Порядок проведення лабораторної роботи

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

2.7. Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості відповідно до завдання, пункт 2.2, 2.3, 2.7.

2.8. Література:

1. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. /Лахтин Ю.М.– М.: Металлургия, 1984. – с. 36-42.
2. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – с. 15-16.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение: методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю. Геллер, А. Рахштад. – М.: Металлургия, 1983. – с. 29-42.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 20

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

МАКРОСКОПІЧНИЙ ТА МІКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

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

3.1. Загальні відомості

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

3.1.1 Макроскопічний метод дослідження полягає у вивченні будови металу (його макроструктури) неозброєним оком, або за допомогою лупи чи бінокулярного мікроскопа при невеликих збільшеннях (до 30...50 раз). Це дозволяє спостерігати водночас велику поверхню заготовки або деталі та одержувати таким чином загальні відомості про якість матеріалу, а також вибрати ділянки для подальшого мікроскопічного аналізу. За допомогою макроаналізу виявляють:

особливості будови литого або гаряче деформованого металу; характер руйнування матеріалу; газові пухирі, усадочні раковини, вкраплення жужелі; якість та будову зварних з'єднань; характер обробки, що застосована для надання деталі кінцевої форми та властивостей (литво, обробка тиском, різання, термічна та хіміко-термічна обробка).

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

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

Кристалічний злам - результат крихкого руйнування під дією нормальних напружень. При цьому зерна не деформуються; зберігається їх форма та розмір. Кристалічний злам характеризується наявністю окремих мікроскопів, що дають у сукупності блискучий фон без помітних ознак

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 21

деформації зразка у місці зламу. Злам називають міжкристалітним, якщо руйнування розвивається по межах зерен (кристалітів), та транскристалітним - безпосередньо через зерна. Міжкристалітний злам завжди крихкий; транскристалітний може бути як при крихкому, так і при в'язкому руйнуванні.

Втомний злам - спостерігається в деталях, що працюють при багаторазових (106...107 циклів) змінних і, особливо, знакозмінних навантаженнях (осі, вали, шестерні, ресори, пружини). За цих умов руйнування може розвиватися при початкових напруженнях, що значно нижче не лише границі міцності, а й границі плинності. Таке явище називають втомою металу і полягає воно у тому, що при багаторазових навантаженнях в місцях з найбільшою концентрацією напружень та з наявністю різних дефектів, різких переходів, перетинів виникають мікротріщини (рис. 3.1). Це призводить до збільшення концентрації напружень і, як наслідок, до подальшого розвитку тріщини (зона поступового руйнування). При цьому деталь продовжує працювати, тому стінки тріщини внаслідок взаємного тертя загладжуються. Дійсний (робочий) перетин деталі зменшується і під дією одного із максимальних навантажень деталь руйнується.

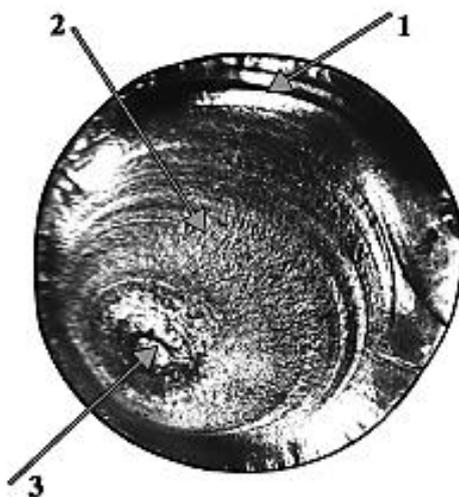


Рис. 3.1. Схема втомного зламу:

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

Зразок із шліфованою та травленою спеціальним реактивом поверхнею називають макрошліфом. Зразок спочатку шліфують за допомогою абразивного круга, потім на наждачному папері, розміщеному на плоскій основі (склі), при цьому напрямок шліфування змінюють на 90°. Шліфування закінчують на папері з дрібним зерном. Підготовлену поверхню протирають

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 22

спиртом і травлять у реактиві, склад якого залежить від металу або хімічного складу сплаву. Розглянемо деякі види макроаналізу.

Форма та розмір кристалів, що утворюються після первинної кристалізації, можуть бути різними в залежності від присутності домішок та умов кристалізації. При значній швидкості охолодження утворюється дендритна структура (дендрон – дерево) (рис. 3.2). Утворення кристалів деревоподібної форми зумовлено анізотропією швидкості росту, тому в першу чергу виростають їх довгі гілки (осі першого порядку), найбільш чисті за вмістом домішок; від них ростуть осі другого порядку, на яких утворюються бічні гілки - осі третього порядку тощо. Внаслідок цього кристал розгалужується; між осями дендритів скупчуються нерозчинені домішки і утворюються дрібні шпарини, що виникають внаслідок зменшення об'єму при переході металу з рідкого стану в твердий. Дендритна будова кристалів інколи спостерігається на поверхні зливка у вигляді характерного рельєфу і особливо помітна при виготовленні мікрошліфа: світлі лінії відповідають осям дендритів, а темні – міжвісним об'ємам, що зумовлено різним травленням цих ділянок унаслідок відмінного вмісту домішок. Найчастіше правильна форма дендритів порушується при зіткненні закристалізованих об'ємів на наступних стадіях кристалізації.

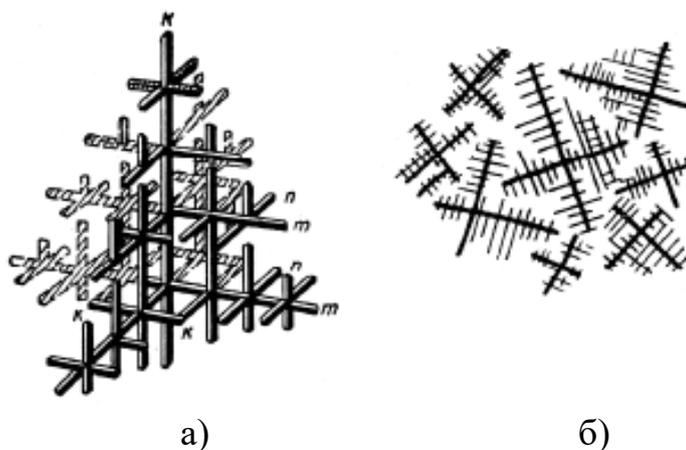


Рис. 3.2. Схема дендритної будови кристалу (а) та росту дендритів (б)

В залежності від напрямку відведення тепла зерна можуть мати рівноважну або стовпчасту (витягнуту) форму. Рідкий метал у ливарній формі або виливниці контактує з їх внутрішньою поверхнею, що має значно нижчу температуру. При цьому утворюється велика кількість зародків кристалізації, що є причиною появи ливарної кірочки з дрібнозернистою структурою (рис. 3.3). Наступні шари металу охолоджуються уже з меншою швидкістю, але при цьому відведення тепла направлено в першу чергу перпендикулярно до стінок форми, тому утворюється друга зона подовжених

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 23

стовпчастих кристалів, що ростуть у напрямку, протилежному відведенню тепла.

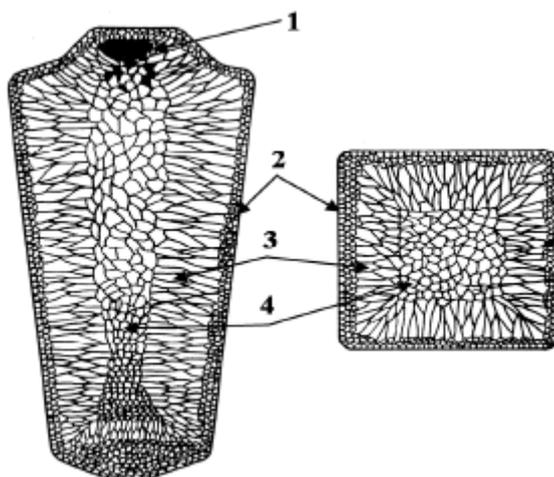


Рис. 3.3. Схема будови металевго зливка:

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

Зона, що розташована у осевій частині зливка, охолоджується з найменшою швидкістю і найбільш рівномірно у всіх напрямках. Унаслідок цього виникає зона рівноважних кристалів, що мають довільну орієнтацію. При сильному перегріванні рідкого металу чи великій швидкості охолодження стовпчасті кристали можуть прорости до осі зливка і рівновісні кристали не утворюються.

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

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 24

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

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

Поверхня зразка (мікрошліфа) має бути дзеркальною для достатньо інтенсивного відзеркалення променів, для цього після операції шліфування проводять полірування мікрошліфа на замші, фетрі чи тонкому сукні, що змочені водною суспензією дрібних частинок оксидів алюмінію, хрому, заліза. Інколи застосовують електролітичне полірування. У всіх випадках після полірування шліф промивають водою, протирають спиртом та сушать.

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

Для виявлення структури поверхню мікрошліфа травлять в розчинах кислот, лугів, солей в залежності від хімічного складу сплаву. Так, наприклад, для сталей і чавунів застосовують травлення 2...5% розчином азотної кислоти в етиловому спирті протягом 2...5 секунд. Ступінь травлення меж зерен та структурних складових різна, тому на поверхні утворюється мікрорельєф у вигляді западин та виступів (рис. 3.4). Западини на межах зерен значно сильніше розсіюють промені, тому межі виглядають як темні лінії (див. рис. 3.4, а). У структурі перліту, що складається з двох фаз (фериту і цементиту), ферит розчиняється швидше цементиту. Цементит виступає та відбиває більше променів і в полі зору буде світлою складовою; друга фаза (ферит), навпаки, через більше розсіювання променів буде виглядати темною. В результаті структура перліту має вигляд темних та світлих смуг (див. рис. 3.4, б).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 25

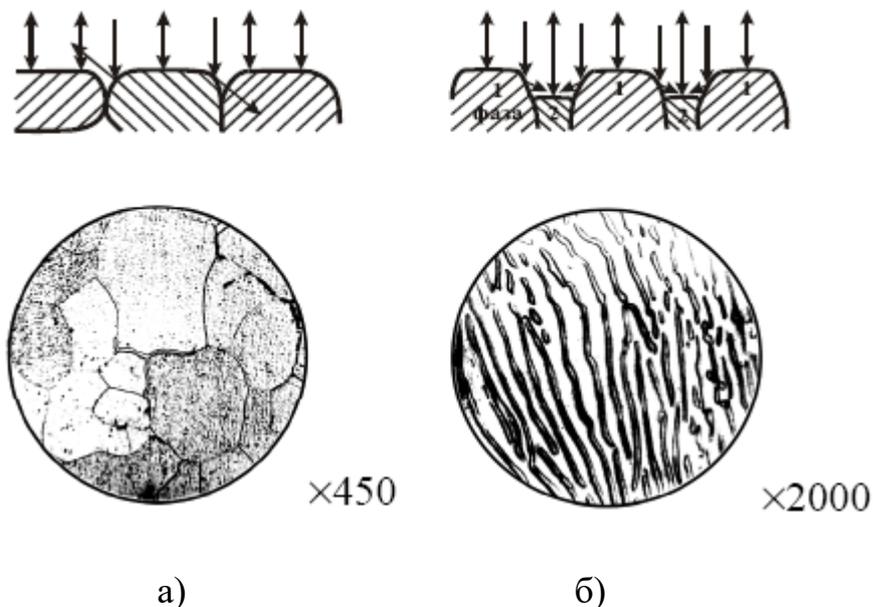


Рис. 3.4. Схема утворення контрасту при мікроскопічних дослідженнях та структура фериту (а) та фазової суміші - перлиту (б)

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

$$M = D/d,$$

де D - найменша відстань, що розрізняється людським оком (0,1...0,2мм).

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

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

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

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

L – оптична довжина тубуса мікроскопа;

250 - відстань найкращого зору, мм;

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

На практиці робоче збільшення встановлюється комбінацією змінних окулярів та об'єктивів у відповідності з таблицею, що додається до мікроскопа.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 26

Оптичний мікроскоп призначений для спостереження та фотографування структури. Основні системи мікроскопа: освітлювальна (джерело світла, конденсор, світлофільтри, діафрагми); оптична (об'єктив, окуляр, дзеркала, лінзи, призми) (рис. 3.5); механічна (штатив, тубус, макрота мікрогвинти тощо) (рис. 3.6).

Для роботи на мікроскопі необхідно:

- вибрати збільшення та встановити відповідні об'єктив та окуляр,
- встановити предметний столик у такому стані, щоб об'єктив знаходився в центрі отвору кільця;
- розмістити досліджуваний шліф на столик полірованою поверхнею донизу;
- при спостереженні в окуляр **3** та обертанні макрогвинта **7** провести грубе наведення на фокус та закріпити столик гвинтом **8**. Точне фокусування здійснити обертанням в тому чи іншому напрямку мікрогвинта **1**;
- дослідити структуру в різних ділянках шліфа, для чого перемістити предметний столик за допомогою гвинтів **6**.

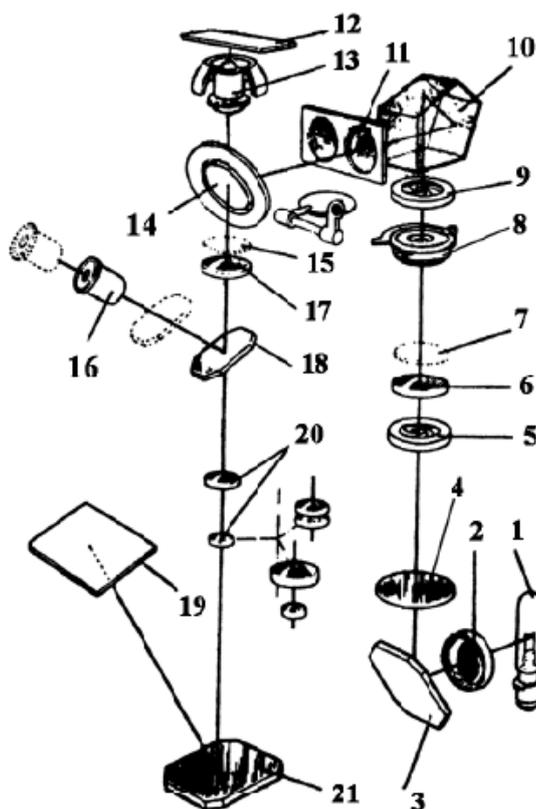


Рис. 3.5. Оптична схема мікроскопа:

- 1 – електрична лампа; 2 – світлофільтр; 3 – дзеркало; 4 – лінза; 5 – апертурна діафрагма; 6 – лінза; 7 – поляризатор; 8 – фотозатвор; 9 – польова діафрагма; 10 – пентапризма; 11 – лінза; 12 – предметний столик; 13 – об'єктив; 14 – віддзеркалювальна пластина; 15 – заслінка (при роботі у темному полі); 16 – окуляр; 17 – лінза; 18 – дзеркало; 19 – матове скло; 20 – фотоокуляр; 21 – дзеркало

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 27

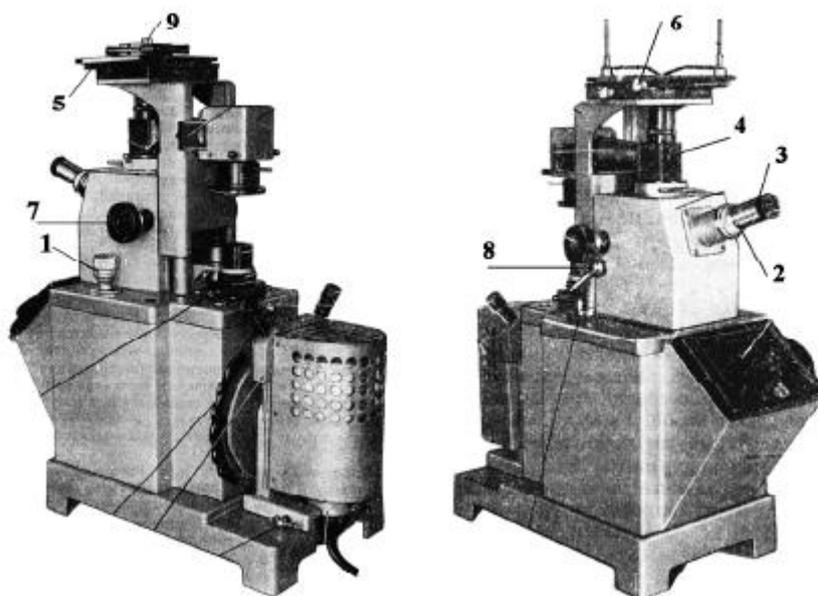


Рис. 3.6. Загальний вигляд мікроскопа МІМ-7:

1 – мікрогвинт; 2 – візуальний тубус; 3 – змінний окуляр; 4 – ілюмінаторний тубус зі змінним об’єктивом; 5 – предметний столик; 6 – гвинти переміщення столика; 7 – макрогвинт; 8 – фіксуєчий гвинт; 9 – зразок

3.2. Завдання

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

3.3. Контрольні запитання

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 28

10. Які деталі будови металу можна виявити на шліфах до та після травлення?
11. Механізм виявлення структури при травленні.
12. Будова металографічного мікроскопа.
13. Як визначається роздільна здатність мікроскопа, його корисне та практичне збільшення?
14. Хід променів в оптичному мікроскопі МІМ-7.

3.4. Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

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

3.5. Вказівки з техніки безпеки

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

3.6. Порядок проведення лабораторної роботи

1. Вивчити будову литого та гарячедеформованого металів, визначити особливості макроструктури.
2. Вивчити та охарактеризувати злами зразків, за видом зламів встановити характер руйнування.
3. Виявити будову та дефекти зварних зразків після їх травлення в реактиві. Реактив налити у ванночку, зразок шліфованою поверхнею опустити у реактив і витримати 2...3 хвилини до появи бурих оксидів. Витягнути зразок з реактиву, промити проточною водою, просушити фільтрувальним папером або струменем гарячого повітря.
4. Вивчити будову мікроскопа, дослідити мікроструктури зразків залізовуглецевих сплавів.
5. Зарисувати та описати макроструктури вивчених зразків. Зарисувати і описати будову зламів.
6. Зарисувати і описати мікроструктуру досліджених зразків до та після травлення (сталі з різним вмістом вуглецю та чавуни із вкрапленнями графіту). Визначити робоче збільшення мікроскопа.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 29

3.7. Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості (пункт. 3.2, 3.3, 3.3, 3.5), схеми макро- і мікроструктури відповідно до порядку проведення роботи. Привести необхідні пояснення і характеристики структури.

3.8. Рекомендована література:

Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение: методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю. Геллер, А. Рахштад. – М.:Металлургия, 1983. – с. 9-83.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 30

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВПЛИВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ НА СТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ

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

4.1. Загальні відомості

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

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

4.1.1. Пружна та пластична деформація

Під дією напружень, величина яких менше ніж границя пружності, в металах виникає пружна деформація. Якщо навантажити метал вище границі пружності, виникає пластична залишкова деформація. При розвантаженні первісна форма та розміри зразка не відновлюються, тому що відбувається незворотній зсув одних частин кристала відносно інших (рис. 4.1 в, г, д) частин кристалу. Основними механізмами зсуву при пластичній деформації є ковзання та двійникування (рис. 4.2).

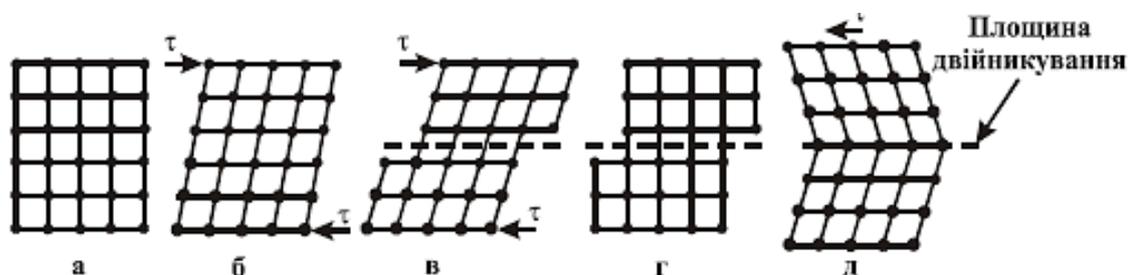


Рис. 4.1. Схема пружної (б) та пластичної (в, г, д) деформації:
а - вихідний стан; в, г - деформації ковзанням;
д - деформація двійникуванням

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 31

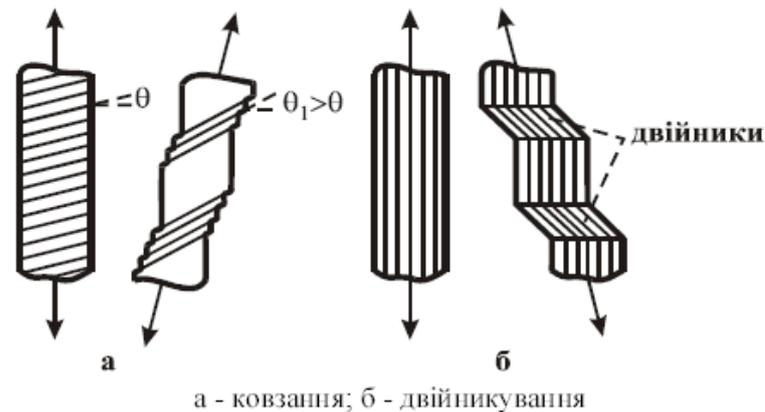


Рис. 4.2. Схеми пластичної деформації

Деформація ковзанням проходить під дією дотичних напружень, більших ніж критичні напруження, по щільно пакованим кристалографічним площинам і напрямкам (рис. 4.3).

В металах з ГЦК ґраткою (γ -залізо, нікель, мідь, алюміній тощо) - це система (111) $[\bar{1}10]$; з ОЦК - (α -залізо, хром, вольфрам, молібден тощо) - (110) $[111]$, (112) $[111]$; з ГЦП ґраткою (магній, цинк, α -титан тощо) - (0001) $[\bar{2}110]$.

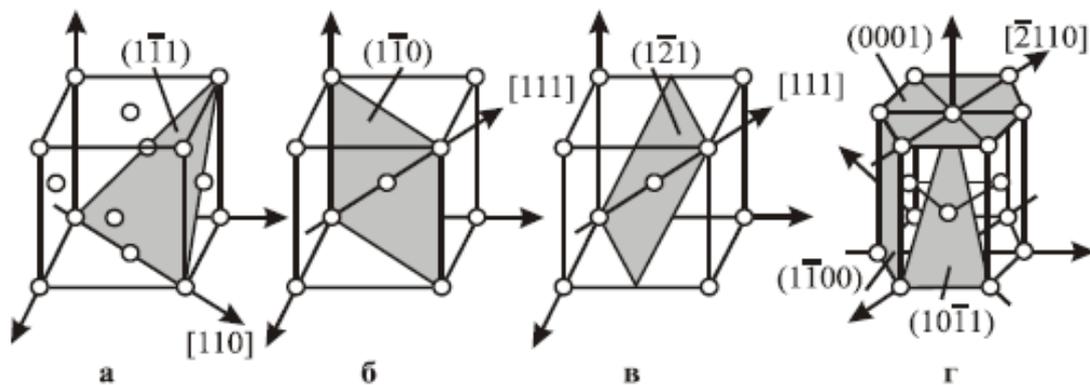


Рис. 4.3. Системи ковзання в ГЦК (а), ОЦК (б, в), ГЦП (г) ґратках

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

Пластична деформація може також здійснюватися двійниками. У цьому випадку частина кристалу перебудовується в дзеркально симетричне положення відносно початкового (рис. 4.1, д та 4.2, б). Двійники відбувається у тих випадках, коли зсув ускладнено, особливо при низьких температурах та великих швидкостях деформування.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 32

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

Дислокації - лінійні дефекти кристалічної будови, що виникають при кристалізації і завжди існують в кристалах. Їх наявність значно спотворює кристалічну ґратку та зменшує рівень дотичних напружень, необхідних для зсуву, за рахунок реалізації естафетного механізму розриву та відновлення міжатомних зв'язків (рис. 4.4).

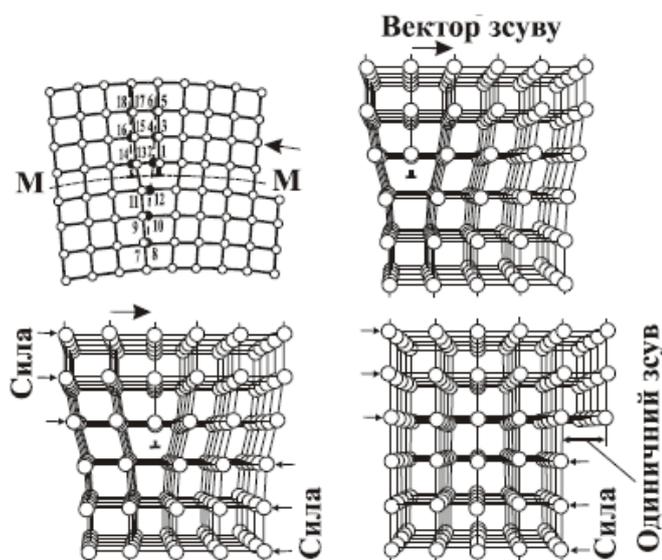


Рис. 4.4. Схема ковзання крайової дислокації з виходом на поверхню

При великій кількості дислокацій можливе їх перетинання, утворення порогів, що зменшує рухомість та потребує для їх переміщення більших напружень, внаслідок чого метал зміцнюється. Кількісною характеристикою дислокацій є густина - сумарна довжина дислокаційних ліній L в одиниці об'єму

$$V \left(\rho = \sum L/V, \text{см}^{-2} \right).$$

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

4.1.2. Структура та властивості холоднодеформованих металів

При малих ступенях деформації (2...5 %) в полікристалах через хаотичність орієнтування зерен деформація не може проходити одночасно у всьому об'ємі металу. В першу чергу деформуються ті зерна, в яких площини легкого ковзання найбільш сприятливо розташовані відносно напрямку діючої сили (під кутом 45°). Зі зростанням деформації зменшується

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 33

розорієнтація зерен, змінюється їх форма – вони витягуються у напрямку прикладеної сили, утворюють волокнисту структуру. При цьому виникає переважна кристалографічна орієнтація, так звана текстура деформації, характерна тим, що більшість зерен зорієнтовано певним кристалографічним напрямком відносно зовнішніх діючих сил (наприклад, за напрямком прокатки або волочіння). Текстура приводить до анізотропії властивостей.

Одночасно зі зміною форми в останньому виникає особлива комірчаста структура з комірками розміром 1...2 мкм із розорієнтацією 2...5°, розділеними невпорядкованими дислокаційними межами. Така структура спостерігається за допомогою електронного мікроскопа. Передача деформації через межі зерен і комірок супроводжується ще більшим нагромадженням дислокацій, зменшенням їх рухомості; зростає опір деформації - метал зміцнюється. Явище зміцнення металів при пластичній деформації називається наклепом і супроводжується зростанням характеристик міцності, твердості (σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ), зниженням пластичності (δ , Ψ) та ударної в'язкості (КСУ). У цьому проявляється єдність суперечних по своїй суті властивостей - міцності та пластичності: міцність визначається опором рухові дислокацій, а пластичність пов'язана з можливістю їх переміщення.

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

Із збільшенням ступеня деформації підвищується електроопір, знижується магнітна проникність, густина металу та опір корозії через посилення дифузійних процесів. Зменшення густини зумовлено зниженням компактності просторової ґратки внаслідок виникнення в ній дефектів.

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

4.1.3. Вплив нагрівання на структуру та властивості холоднодеформованого металу

Стан деформованого металу термодинамічно нестабільний. Перехід до більш стабільного стану з меншою вільною енергією відбувається при його

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 34

нагріванні. Процеси, що проходять при нагріванні, супроводжуються практично повним відновленням фізичних та механічних властивостей та умовно поділяються на три температурні стадії: відпочинок, полігонізація, рекристалізація.

Відпочинок і полігонізацію називають відновою. Для цих стадій характерно лише часткове відновлення властивостей (рис. 4.5).

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

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

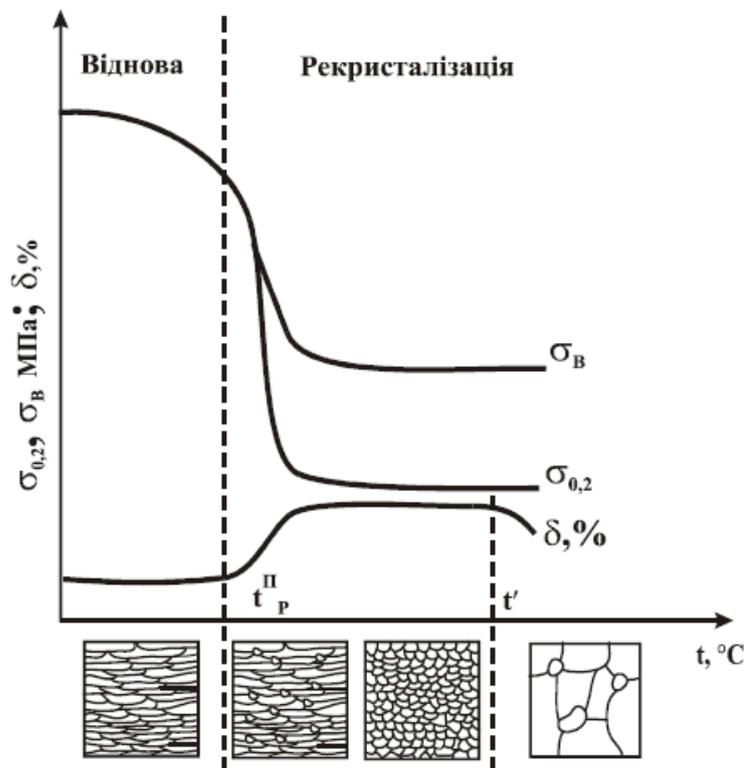


Рис. 4.5. Вплив нагрівання на механічні властивості та структуру деформованого металу

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 35

На стадії віднови видимих змін в мікроструктурі не спостерігається (розмір та форма деформованих зерен зберігається). Зате відновлюється рівень електричного опору, підвищується густина металу та частково зменшуються твердість і міцність (рис. 4.5). Зміну в дислокаційній структурі можна виявити лише при великих збільшеннях за допомогою електронного мікроскопа.

Рекристалізація - це зародження та ріст нових рівновісних зерен, що відрізняються від деформованої матриці досконалішою ґраткою та значно меншою густиною дислокацій (рис. 4.5, 4.6). Зародки рекристалізації виникають на ділянках з найбільшою деформацією ґратки (найчастіше на межах деформованих зерен). Чим вище ступінь пластичної деформації, тим більше виникає центрів рекристалізації. Ріст зародків реалізується міграцією меж. Останні рухаються вглибину наклепаного металу у напрямку більшої густини дислокацій і залишають за собою об'єм з відносно досконалою ґраткою. Із зникненням деформованих зерен завершується первинна рекристалізація (рекристалізація обробки).

Після первинної рекристалізації зникає наклеп, створений пластичним деформуванням, збільшується пластичність. Знеміцнення пояснюється усуненням спотворень кристалічної ґратки та зменшенням густини дислокацій з 10^{12} см^{-2} до 10^6 см^{-2} ; метал набуває рівновісної структури з мінімальною кількістю дефектів, відновлюються всі його фізичні та механічні властивості (див. рис. 4.5).

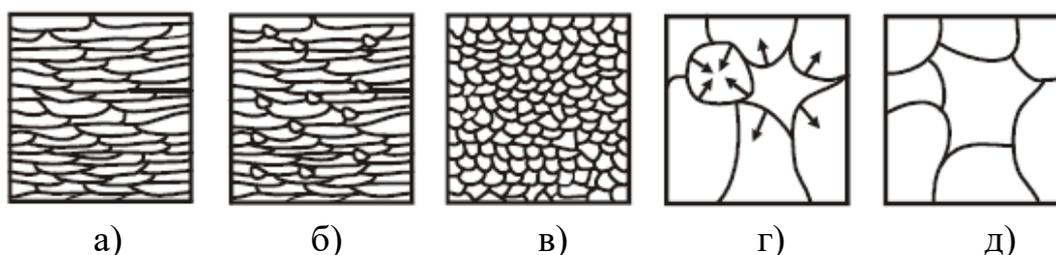


Рис. 4.6. Схема зміни мікроструктури наклепаного металу при нагріванні:
а – наклепаний метал; б, в – початок та кінець первинної рекристалізації (рекристалізації обробки); г, д – збиральна рекристалізація

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

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

$$T_P^{\text{II}} = kT_{\text{пл}}, [t^0 \text{ C} = k(t_{\text{пл}}^0 \text{ C} + 273^0) - 273^0]$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 36

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

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

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

Температурний поріг рекристалізації - це технологічна характеристика, яка залежить від чистоти матеріалу і температури плавлення, в більшості випадків визначають як температуру напівзміцнення після нагрівання тривалістю 1...2 години та значної ($\epsilon > 50\%$) попередньої пластичної деформації.

З метою повного зняття наклепу та досягнення пластичності застосовують рекристалізаційний відпал - нагрівання до температур на 100...200 °С вищих за $T_R^П$ з наступним повільним охолодженням. Таке відпалення часто використовують як пом'якшувальну проміжну операцію при волочінні, після холодної прокатки та інших технологічних процесів.

Після завершення первинної рекристалізації підвищення температури викликає ріст одних рекристалізованих зерен за рахунок сусідніх, також рекристалізованих, шляхом міграції меж (збиральна рекристалізація). Основна рушійна сила цього процесу - зменшення зерномежової енергії внаслідок скорочення довжини меж зерен. Межа рухається у напрямку центру її кривизни (рис. 4.6, г). Збільшення розмірів зерен приводить до зниження пластичності (рис. 4.5, $t > t_c$).

4.1.4. Критичний ступінь деформації. Розмір зерна після рекристалізації.

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

Критичний ступінь деформації незначний, тому зерна деформуються неоднорідно: у першу чергу ті, у яких площини найбільш легкого ковзання збігаються з напрямком максимальних дотичних напружень. Існуючих дислокацій не вистачає для утворення зародків рекристалізації. Укрупнення зерен після нагрівання зумовлено, по-перше, ростом деяких первинних зерен під впливом градієнту наклепу, а по - друге - злиттям декількох зерен за рахунок поступового зникнення меж зерен при анігіляції дислокацій та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 37

інших дефектів. Укрупнення зерен приводить, як правило, до зниження властивостей металу, тому при обробці металів тиском критичного ступеня деформації уникають.

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

4.1.5. Холодна та гаряча деформації

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

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

4.2. Завдання

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

4.3. Контрольні запитання

1. Механізм пружної та пластичної деформації.
2. Вкажіть системи ковзання для металів з ОЦК, ГЦК та ГЦП ґратками.
3. Типи дефектів кристалічної будови та їх вплив на властивості металів.
4. Поняття наклепу. Роль дислокацій у цьому процесі.
5. Густина дислокацій до та після холодної пластичної деформації.
6. Теоретична та реальна міцність металів.
7. Вплив холодної пластичної деформації на структуру та властивості металів.
8. Які процеси відбуваються в холоднодеформованому металі при нагріванні? Їх рушійні сили.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 38

9. У чому полягає різниця між процесами полігонізації та рекристалізації?
10. Первинна рекристалізація, її відміна від збиральної рекристалізації.
11. Критичний ступінь деформації.
12. Температурний поріг рекристалізації та визначення температури рекристалізаційного відпалення.
13. Холодна та гаряча пластична деформація. Їх відмінні особливості.

4.4. Матеріали, інструмент, прилади та устаткування

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

4.5. Вказівки з техніки безпеки

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

4.6. Порядок виконання роботи

- 1 Визначити твердість і зарисувати мікроструктуру зразків після деформації і відпалу. Визначити номер зерна, порівнюючи спостережену структуру з еталонним зображенням структури при збільшенні 100 разів. Дані записати в табл. 4.1.
- 2 Визначити твердість зразків сталей 08кп та 08ХІ8Т1 після холодної пластичної деформації ($\epsilon = 60\%$) та подальшого нагрівання при 400...800°C тривалістю в одну годину (табл. 4.2).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 39

Таблиця 4.1 – Твердість і структура сталі 08кп після холодної деформації та наступного рекристалізаційного відпалу

Ступінь деформації $\epsilon, \%$	Після холодної деформації		Після рекристалізаційного відпалу		
	Твердість, HRB	Структура (зарисувати)	Твердість, HRB	Структура (зарисувати)	Номер зерна
0					
5					
10					
25					
60					
80					

Таблиця 4.2 – Твердість сталей 08кп та 08X18Т1 після нагрівання при різних температурах

Марка сталі	Твердість, HRB					
	Після деформації ($\epsilon=60\%$)	Після нагрівання 1 год. при температурах, $^{\circ}\text{C}$				
		400	500	600	700	800
08кп						
08X18Т1						

4.7. Зміст звіту

1. Основні положення загальних відомостей.
2. Графік залежності твердості сталі 08кп від ступеня деформації.
3. Обґрунтувати принципи підвищення твердості з ростом ступеня деформації. Вказати, як при цьому змінюється структура.
4. Побудувати графік залежності твердості від ступеня деформації зразків сталі 08кп після рекристалізаційного відпалення.
5. Побудувати графік залежності розміру зерна після деформації і нагрівання 680°C , 1 год. в залежності від ступеня деформації. Пояснити причину аномального росту зерен при нагріванні після деформації ($\epsilon_{\text{крит}}$) та чому зразок, деформований на 80%, має після відпалювання дрібніше зерно порівняно з зерном зразка, попередньо деформованого на 60%.
6. Накреслити графік залежності твердості від температури нагрівання для зразків сталей 08кп і 08X18Т1 ($\epsilon = 60\%$). Пояснити одержані залежності. Визначити температурний поріг рекристалізації та вибрати температуру рекристалізаційного відпалення. Встановити вплив легувальних елементів на ці характеристики.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 40

4.8. Рекомендована література

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Потітехніка», 2001. – с. 60-84.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 67-68.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Лахтин Ю.М. – М.: Металлургия, 1984. – с. 43-49, 53-60.
4. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – с. 61-19, 83-96.
5. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 77-84, 107-120.
6. Материаловедение / Под ред. В.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – с. 66-79.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 41

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. МІКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДПАЛЕНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

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

5.1. Загальні відомості

Серед металевих матеріалів у машинобудуванні найбільш широко використовуються сплави заліза з вуглецем - сталі та чавуни (на 90% від загальної кількості матеріалів). Визначити структури цих сплавів у стані рівноваги, температури фазових перетворень, вибрати температуру термічної обробки дозволяють метастабільна діаграма стану “залізо-цементит” (*Fe-Fe₃C*) та стабільна діаграма стану “залізо-вуглець” (*Fe-C*).

5.1.1. Компоненти, фази та структурні складові залізовуглецевих сплавів

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

Залізо - метал з температурою плавлення 1539 °С (крива охолодження чистого заліза показана на рис. 4.1). Атомний радіус 0,127 нм. Залізо поліморфне. Нижче 911 °С має ОЦК ґратку з параметром 0,286 нм при 20 °С, в інтервалі 1392...1539 °С – 0,293 нм. Заповнення об'єму ґратки атомами на 68 %. Низькотемпературна модифікація позначається **Fe_α**, високотемпературна – **Fe_δ**. В інтервалі температур 911...1392 °С існує **Fe_γ** з ГЦК ґраткою, параметри якої 0,3645 нм, заповнення об'єму ґратки атомами на 74 %. Між атомами заліза існує металевий тип зв'язку. Нижче 768 °С **Fe_α** феромагнітне, **Fe_γ** - парамагнітне. Чисте залізо – метал сріблястого кольору, порівняно м'який і пластичний, з густиною $\gamma = 7,86 \text{ г/см}^3$. Міцність заліза складає $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$, твердість НВ 60...80, пластичність $\delta = 45 \%$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 42

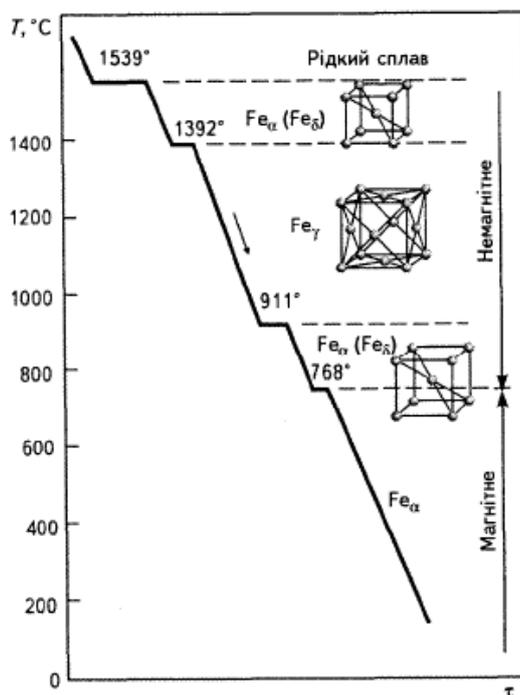


Рис. 5.1. Крива охолодження чистого заліза

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

Вуглець – неметал з температурою плавлення 3600°C , атомним радіусом – 0,077 нм. Має дві модифікації: стабільну – у вигляді графіту та метастабільну – у вигляді алмазу. У звичайних умовах він знаходиться у вигляді модифікації графіту. Вуглець розчиняється в залізі у рідкому і твердому станах, а також може знаходитися у вигляді хімічної сполуки Fe_3C – **цементиту**, а у високовуглецевих сплавах і у вигляді **графіту**.

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

Крім зазначених фаз в сплавах системи Fe–C присутні ще дві структурні складові: ледебурит (Л) і перлит (П).

Ферит - твердий розчин втілення атомів вуглецю в ОЦК гратці заліза. Розрізняють низькотемпературний α -ферит з граничною розчинністю вуглецю 0,02% при 727°C та високотемпературний δ -ферит (0,1 % С при 1499°C). Низька розчинність вуглецю у фериті обумовлена малим радіусом порожнин в ОЦК гратці (0,037 нм). Механічні властивості фериту: $\sigma_B=200...250$ МПа; $\delta=40...50$ %; НВ 80...90.

Аустеніт - твердий розчин втілення атомів вуглецю в Fe_γ (ГЦК гратці), радіус міжатомних порожнин дорівнює 0,052 нм. Цим обумовлена підвищена, порівняно із феритом, розчинність вуглецю в аустеніті - 2,14 %

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 43

при 1147 °С. Аустеніт має наступні механічні властивості: $\delta = 50\text{...}60\%$; НВ 160...200. Фаза в'язка, парамагнітна.

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

Цементит - хімічна сполука Fe_3C , що містить 6,67 % С. Гратка - складна ромбічна, характеризується металевим зв'язком між атомами заліза та ковалентним – між залізом і вуглецем. Тому цементит має високу твердість (НВ³ 800), крихкість і практично нульову пластичність.

Цементит - метастабільна фаза і у високовуглецевих сплавах (>2,14 % С) при дуже повільному охолодженні замість нього може утворюватися графіт.

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

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

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

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

5.1.2. Метастабільна діаграма Fe-Fe₃C

Складність діаграми $Fe-Fe_3C$ (рис. 5.2) зумовлена тим, що у залізовуглецевих сплавах, окрім первинної кристалізації (рідина→тверда фаза) відбуваються процеси вторинної кристалізації в твердому стані, які пов'язані з поліморфними перетвореннями заліза та зменшенням розчинності вуглецю у фериті та аустеніті.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 44

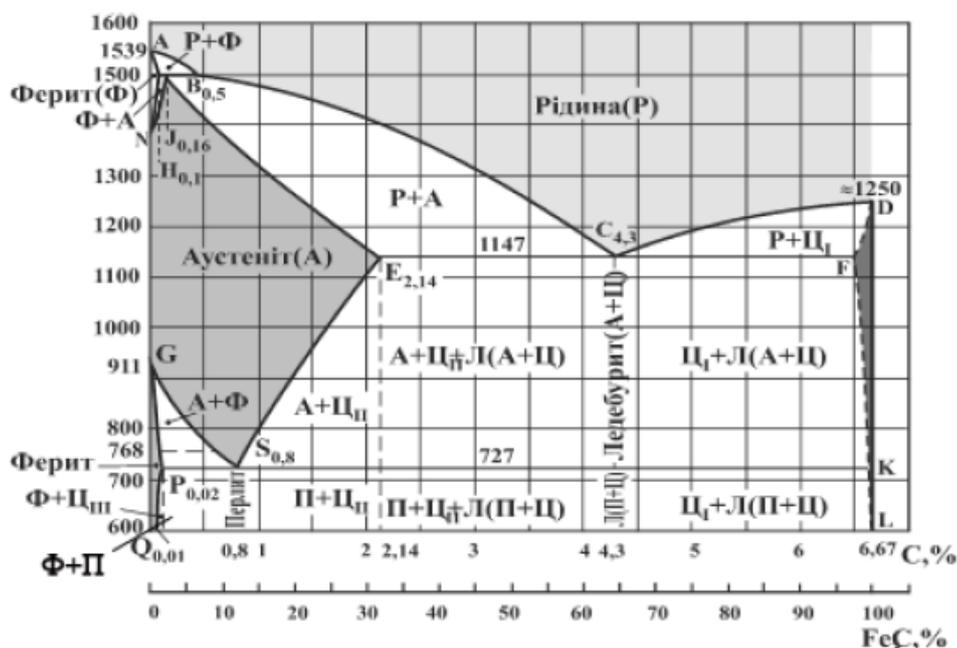
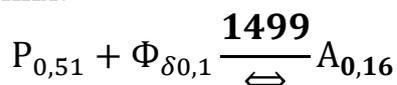


Рис.5.2. Метастабільна діаграма стану $Fe-Fe_3C$

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

Лінії діаграми - це геометричне місце точок, що характеризують хімічний склад фаз, які знаходяться у рівновазі, температури початку та кінця фазових перетворень. З теорії кристалізації відомо, що перехід від рідкого стану в твердий відбувається не при температурі рівноваги T_0 для цих фаз, а при деякому переохолодженні ΔT . Тому далі при розгляді перетворень, що проходять в реальних умовах буде матися на увазі, що вони відбуваються при деякому переохолодженні (перегріванні) відносно температур рівноваги.

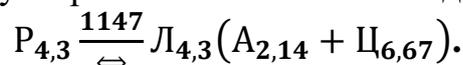
Первинна кристалізація. За лінією ліквідусу АВСД починається кристалізація з рідкої фази: δ -фериту Φ_δ (АВ), аустеніту А (ВС) та цементиту первинного Ц_I (СД). Лінія АН - температурна межа двофазної зони “рідина+ Φ_δ ”, нижче цієї лінії - однофазна зона Φ_δ . **НJB** – лінія перитектичного перетворення:



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

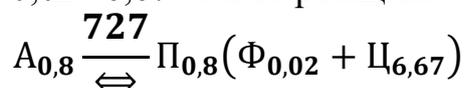
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 45

Лінія **JE** - температурна межа двофазної зони P+A, кінець кристалізації аустеніту; нижче цієї лінії - однофазна зона аустеніту. **ECF** - лінія евтектичної рівноваги з утворенням нижче 1147° ледебуриту:



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

PSK - лінія евтектоїдного перетворення A→П при постійній температурі в сплавах із 0,02...6,67 % С за реакцією:



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

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

5.1.3. Перетворення в сплавах при охолодженні та нагріванні

Перетворення при охолодженні розглянемо на прикладі сплаву X_1 із 0,45 % вуглецю (рис. 5.3, а). При охолодженні від температури t_0 до t_1 сплав знаходиться у рідкому стані. При t_1 починається кристалізація δ -фериту. При охолодженні в інтервалі $t_1...t_2$ склад рідкої фази змінюється за лінією АВ, а δ -фериту - за лінією АН, внаслідок чого при t_2 фази мають склад, необхідний для здійснення перитектичної реакції: вмісту вуглецю в рідкій фазі відповідає точка В, в δ -фериті – точка Н. При t_2 - нонваріантна рівновага, тому що в реакції приймають участь три фази: P_B , Φ_H , A_J . У сплаві після перетворення є надлишок рідкої фази, з якої в інтервалі $t_2...t_3$ утворюються кристали аустеніту. В інтервалі температур $t_3...t_4$ існує одна фаза - аустеніт.

При t_4 починається $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, тому в інтервалі $t_4...t_5$ сплав двофазний. Склад фериту змінюється при цьому по лінії **GP**, аустеніту - **GS**, тобто при t_5 склад аустеніту відповідає евтектоїдному і при цій температурі утворюється перлит. В інтервалі $t_5...t_6$ сплав двофазний, його структура

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 46

перлитно-феритна. Внаслідок зменшення розчинності вуглецю в фериті в інтервалі $t_5 \dots t_6$ виділяється цементит третинний по лінії **PQ**.

Крива охолодження (див. рис. 5.3, б) побудована на підставі розрахунків ступенів свободи з використанням правила фаз.

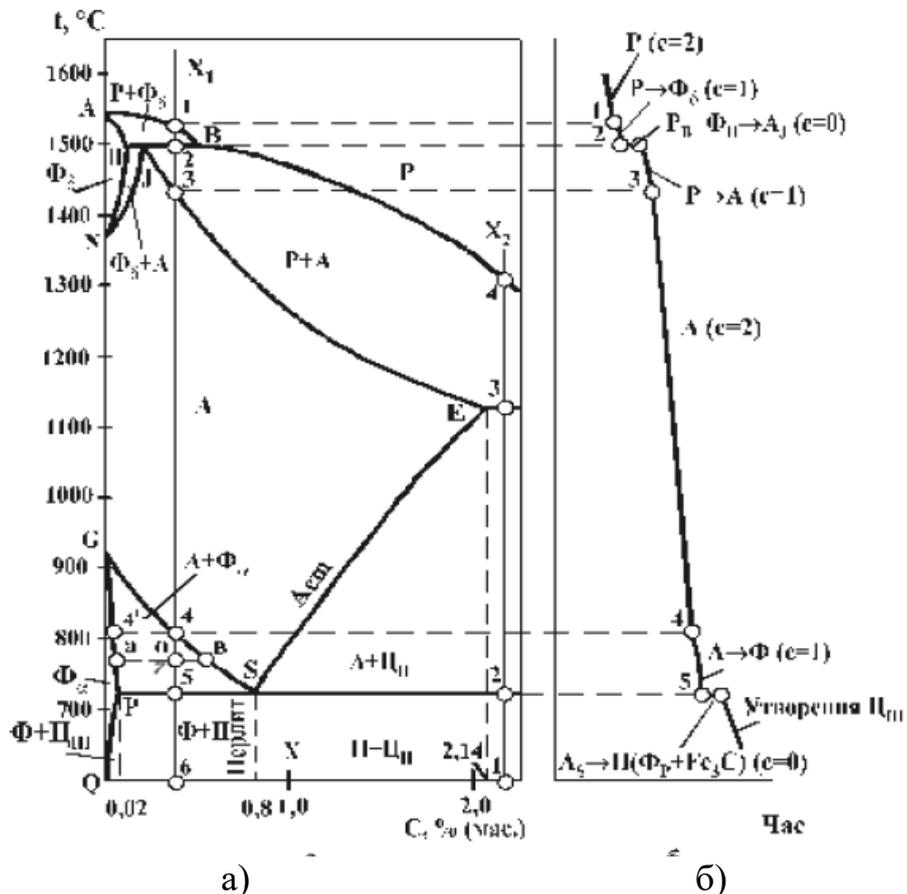


Рис.5.3. Сталева частина діаграми $Fe-Fe_3C$ (а) та крива охолодження сплаву X_1 (б)

Концентрацію вуглецю в фазах при заданій температурі визначають за допомогою температурної лінії (коноди), паралельної осі концентрацій та проведеної у зоні існування фаз. Визначимо, наприклад, в сплаві X_1 при $t_7=750^\circ\text{C}$ хімічний склад фериту та аустеніту (див. рис. 5.2,а). Для цього проведемо паралельно осі концентрацій пряму лінію (коноду) до її перетину з лініями **GS** та **GP**, що обмежують зону діаграми, в якій знаходиться сплав. Проекції точок перетину визначають концентрацію вуглецю: точка **а** (0,015%С) - у фериті, точка **в** (0,6%С) – в аустеніті.

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 47

$$Q_{\Phi} = \frac{xL}{QL} \cdot Q_C \text{ та } Q_{\text{Ц}} = \frac{Q_x}{QL} \cdot 100\%,$$

де Q_C – загальна маса сплаву.

Звідки, нехтуючи кількістю вуглецю в фериті (0,02 %), маємо:

$$Q_{\Phi} = \frac{6,67-1,0}{6,67} = 0,85(85\%); \quad Q_{\text{Ц}} = \frac{1,0}{6,67} = 0,15(15\%).$$

Обчислена кількість Ц складається із структурно вільного Ц_{II} та цементиту перліту, ферит знаходиться у перліті.

Перетворення при нагріванні розглянемо на прикладі сплаву X_2 із 2,2%С (див. рис. 5.2, а).

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

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

5.1.4. Вуглецеві сталі

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

Вуглецеві сталі класифікують за кількома ознаками: за рівноважною структурою, за хімічним складом, за ступенем розкислення, за якістю та за призначенням.

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

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 48

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

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

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

Зі збільшенням в сталі вмісту вуглецю зростає кількість цементиту, що має велику твердість і крихкість, а тому його частинки є перешкодою на шляху ковзання дислокацій. Унаслідок цього зростають міцність і твердість сталі, знижуються показники ударної в'язкості і пластичності. Зниження міцності заевтектоїдних сталей зумовлено наявністю крихкої сітки структурно вільного цементиту. Твердість сталі монотонно зростає із збільшенням вмісту вуглецю. На рис. 5.4. представлений характер зміни мікроструктури сталей в залежності від вмісту вуглецю.

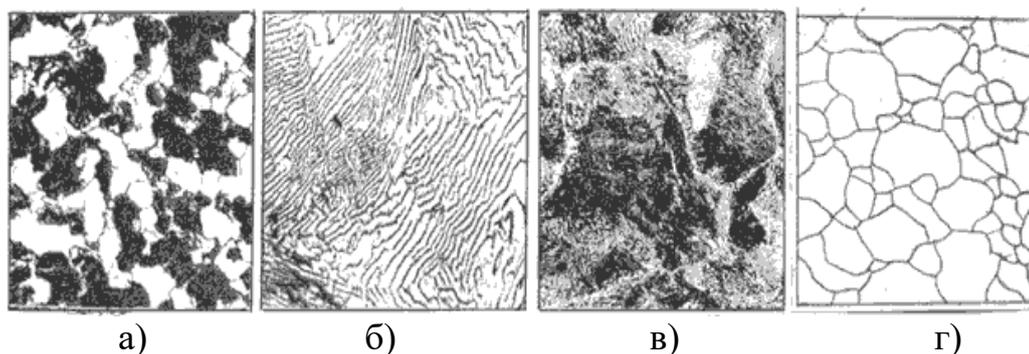


Рис. 5.4. Мікроструктури доевтектоїдної (а), евтектоїдної (б), заевтектоїдної (в) сталей і технічно чистого заліза (г)

Вуглець впливає також на фізичні властивості сталі: зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі знижується її густина, теплопровідність, залишкова індукція, магнітна проникність, росте електричний опір і коерцитивна сила.

Постійними домішками в сталі є кремній ($\leq 0,37\%$), марганець ($\leq 0,8\%$), сірка ($\leq 0,05\%$), фосфор ($\leq 0,04\%$). Марганець і кремній вводять у сталь для розкислення при її виплавланні. Кремній сильно підвищує границю текучості σ_T і знижує пластичність сталі. Тому в сталях, які призначені для холодного штампування і глибокої витяжки концентрацію кремнію обмежують на рівні $0,17\%$, а інколи навіть до $0,07\%$.

Марганець помітно підвищує міцність сталі, практично не знижуючи пластичність і прогартовуваність, зменшує червоноламкість, що викликається впливом сірки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 49

Сірка є шкідливою домішкою в сталі. Вона потрапляє в сталь з руди чи палива. Із залізом сірка утворює хімічну сполуку FeS , яка практично не розчиняється в фериті, а створює легкоплавку евтектику з температурою плавлення $988^{\circ}C$. Ця евтектика переважно розташовується по межах зерен. Під час гарячого деформування (прокатування, кування) з температурою процесу $1000\dots\dots 1200^{\circ}C$ евтектика розплавляється, порушується зв'язок між зернами металу, внаслідок чого в місцях розташування евтектики виникають надриви і тріщини. Це явище носить назву «червоноламкість». При наявності марганцю в сталі замість FeS утворюється сульфід марганцю MnS з температурою плавлення $1620^{\circ}C$, завдяки чому усувається явище червоноламкості. Сірчисті включення знижують ударну в'язкість (KCU) і пластичність (δ, Ψ), а також границю витривалості (σ_R). Сірка крім того, погіршує зварюваність і корозійну стійкість. Тому вміст сірки обмежують: у сталях звичайної якості – до 0,05%, якісних – до 0,04%, високоякісних – до 0,025%.

Фосфор є також шкідливою домішкою. Він розчиняється у фериті і при цьому сильно спотворює кристалічну ґратку заліза, внаслідок чого підвищуються границі міцності та текучості, але знижується пластичність і в'язкість сталі. Фосфор підвищує поріг холодноламкості, тобто температуру переходу сталі в крихкий стан. Шкідливий вплив фосфору посилюється внаслідок великої схильності його до ліквідації. Тому кількість фосфору в сталях також обмежують: у сталях звичайної якості – до 0,04%, в якісних – до 0,035%, а в високоякісних – до 0,025%.

За ступенем розкислення сталі поділяють на киплячі ($\leq 0,07\%Si$), напівспокійні ($0,07 < Si < 0,17$) та спокійні ($0,17 < Si < 0,37$). Киплячу сталь позначають літерами «кп» наприкінці марки сталі, наприклад: Ст3кп, 05кп; напівспокійну сталь – літерами «нс», наприклад: Ст3нс, 08нс; спокійну сталь у більшості випадків літерами не позначають за виключенням сталей звичайної якості, які позначають літерами «сп», наприклад Ст3сп.

Якість сталі визначається в першу чергу кількістю шкідливих домішок – фосфору і сірки. Тому в основу класифікації за якістю покладено вміст в сталі P і S. За цією ознакою вуглецеві сталі поділяють на сталі звичайної якості ($S \leq 0,05\%$, $P \leq 0,04\%$); якісні ($S \leq 0,04\%$, $P \leq 0,035\dots 0,04\%$) та високоякісні ($S \leq 0,02\%$, $P \leq 0,03\%$).

Класифікація сталей за призначенням. Маркування сталей.

У залежності від вмісту вуглецю сталі поділяються на **конструкційні** ($0,02\dots 0,8\%C$) та **інструментальні** ($0,7\dots 1,3\%C$). Умовною межею між ними вважають вміст вуглецю 0,7 %. В дійсності сталі з $(0,7\dots 0,8)\%C$ можуть бути як інструментальними, так і конструкційними (наприклад, ресорно-пружинна).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 50

Конструкційні сталі повинні поєднувати достатню міцність і в'язкість. Таким вимогам відповідають доевтектоїдні сталі.

Конструкційні сталі в свою чергу за технологічною ознакою поділяються на ливарні та сталі, що деформуються. Сталі, що деформуються, всвою чергу поділяються, в залежності від вмісту шкідливих домішок, на звичайної якості, якісні та автоматні.

Сталі звичайної якості, відповідно до ГОСТ 380-94, ДСТУ 2651:2005/ГОСТ380-2005 маркують літерами «Ст» і цифрами, які вказують номер марки, а наприкінці марки ставлять, в залежності від ступеня розкислення, літери «кп», «нс» або «сп». Ці сталі мають підвищений вміст сірки та фосфору. Цифри від 0 до 6 в маркуванні сталей – це умовний номер марки сталі. З збільшенням номера марки зростає міцність і знижується пластичність сталі. По гарантії при поставці існує три групи сталей: А, Б і В. В ці групи входять наступні марки сталей:

А – Ст.0, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4, Ст.5, Ст.6;

Б – БСт.0, БСт.1, БСт.2, БСт.3, БСт.4, БСт.5, БСт.6;

В – ВСт.2, ВСт.3, ВСт.4, ВСт.5.

Для сталей групи А при поставці гарантуються механічні властивості, в позначенні індекс групи А не вказують. Для сталей групи Б гарантується хімічний склад. Для сталей групи В при поставці гарантуються і механічні властивості і хімічний склад.

Маркуються Ст.2кп, БСт.3кп, ВСт.3нс, ВСт.4сп.

Із сталей цієї групи виготовляють гарячекатаний прокат (балки, прутки, швелери, листи, труби), застосовують для будівельних конструкцій та мало відповідальних деталей машин.

Вуглецеві сталі якісні, відповідно до ГОСТ 1050-88, маркують двозначним числом, що вказує на середній вміст вуглецю в сотих долях відсотка. Ступінь розкислення позначається літерами «кп», «нс», які ставлять після числа. В спокійних сталях літери «сп» не ставлять. Наприклад, 05кп, 08кп, 10, 15, ...35, 40, ...85.

Сталі марок 05, 08, 10 після відпалювання добре штамнуються в холодному стані. Низьковуглецеві сталі марок 15, 20, 25 належать до тих, що цементуються. Середньо вуглецеві сталі 30, 35, 40, 45 і 50 належать до сталей, що поліпшуються. З таких сталей виготовляють вали, шатуни, шестерні та інші деталі. Високо вуглецеві сталі марок 60, 65, 70, 75, 80 і 85 використовують для пружин, ресор, тросів. Із сталі 60 виготовляють суцільнокатані колеса, валки прокатних станів.

Автоматні сталі (ДСТУ3833-98/ГОСТ 1414-75) мають підвищену оброблюваність різанням, що забезпечується підвищеним вмістом сірки (до 0,25%) і фосфору (до 0,15%). Маркують літерою «А» і числом, яке вказує на середній вміст вуглецю в сотих долях відсотка: А12, А20, А30 і А35. Оброблюваність різанням поліпшується також введенням у вуглецеву сталь свинцю, або селену в кількості 0,15...0,30%. При маркуванні таких сталей

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 51

після літери «А» ставлять літеру «С», або «Е» в кінці маркування: АС14, АС40, А35Е, А40Е.

Автоматні сталі мають понижені механічні властивості, тому їх використовують тільки для мало навантажених деталей.

Ливарні сталі (ГОСТ 977-88) маркують числом, що вказує на вміст в сотих долях відсотка, та літерою «Л» в кінці марки, наприклад 15Л, 20Л, 25Л тощо. Ливарні сталі використовують для деталей арматури, великих шестерень, валків та інших деталей.

Інструментальні вуглецеві сталі за якістю поділяються на якісні та високоякісні. Відповідно до ГОСТ 1435-74 якісні інструментальні сталі маркують літерою «У» і числом, що вказує на середній вміст вуглецю в десятих долях відсотка: У7, У8, У9,..., У13. У марках високоякісних інструментальних сталей в кінці марки ставлять літеру «А», наприклад, У7А, У8А, ..., У13А.

Інструментальні сталі з відносно низьким вмістом вуглецю (У7, У8) мають високу в'язкість і використовуються для виготовлення зубил, молотків, кернерів, викруток, штампів тощо. Заевтектоїдні сталі (У9, , У13) застосовують для інструментів, що потребують високої твердості та не дуже високої в'язкості: мітчиків, свердл, напилків, ножівок, вимірювальних інструментів. Недоліками вуглецевих інструментальних сталей є їх незначна прогартовуваність і низька теплостійкість (до 200 °С).

Деякі групи сталей, їх маркування та призначення наведено в табл. 5.1-5.4.

Таблиця 5.1 – Сталі вуглецеві конструкційні звичайної якості (ГОСТ 380-94, ДСТУ 2651:2005/ГОСТ380-2005)

Марка сталі	Вміст елементів, %					Призначення
	С	Mn	Si	≤P	≤S	
1	2	3	4	5	6	7
Ст0	≤0,23			0,07	0,06	Конструкції невідповідального призначення: загородження, прокладки, шайби тощо. Добра зварюваність.
Ст1кп	0,06 0,12	0,25 0,5	0,05	0,04	0,05	Для деталей, що вимагають високої в'язкості: анкерні болти, арматура тощо. Добра зварюваність.
Ст3сп	0,14 0,22	0,4 0,15	0,15 0,3	0,04	0,05	Балки, ферми, корпуси посудин, що працюють під тиском; деталі, що цементують: шестерні, вісі тощо. Добра зварюваність

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 52

Ст5Гсп	0,22 0,3	0,8 1,2	0,15	0,04	0,05	Для деталей, що витримують невеликі напруги: вали, вісі, серги, ресори тощо.
Ст6сп	0,38 0,49	0,5 0,8	0,15 0,8	0,04	0,05	Деталі підвищеної міцності: вісі, вали, тяги, пальці траків, шпінделі тощо.

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

Таблиця 5.2 – Сталі вуглецеві конструкційні якісні (ГОСТ 1050-88)

Група сталі	Маркування	Призначення
1	2	3
Низьковуглецеві (0,05.....0,08)	05, 08	Мають малу міцність та високу пластичність, використовуються без термічної обробки для холодного штампування, холодного вичавлювання: кузови автомобілів, корпуси приладів, прокладки, трубки тощо.
Маловуглецеві (0,10...0,30 %С)	10, 15, 20,25	Для деталей, що піддають цементації (ціануванню) та працюють на зношування без великих навантажень: втулки, осі кулачкових валиків, кільця ланцюгів тощо.
Середньовуглецеві (0,30...0,50%С)	30, 35, 40,45, 50	Після нормалізації, поліпшення чи поверхневого гартування для деталей, що зазнають згинання, обертання, зношування, ударного навантаження: колінчасті та розподільні вали, плунжери, шестерні та вали редукторів тощо.
3 вмістом вуглецю (0,55-0,80%)	55, 60, 65, 70, 75, 80	Після гартування та середньотемпературного відпускання мають високі пружні властивості та використовуються для виготовлення невеликого розміру у перерізі пружин, ресор тощо.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 53

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

Таблиця 5.3 – Автоматні сталі (ДСТУ3833-98)

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

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

Таблиця 5.4 – Сталі вуглецеві інструментальні (ГОСТ 1435-99)

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 54

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

5.2. Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Накреслити діаграму $Fe-Fe_3C$ (формат А4). У всіх зонах діаграми вказати структуру, а в квадратних дужках - фази. Коротко описати фази (Ф, А, Ц) та структурні складові (П, Л) залізовуглецевих сплавів; перитектичну, евтектичну та евтектоїдну реакції; маркування та призначення сталей.

5.3. Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

1. Що визначають точки G та N на діаграмі стану $Fe - C$?
2. Як впливає вуглець на температуру поліморфного перетворення заліза?
3. Що визначають точки A_4, A_3, A_2, A_1 для чистого заліза та його сплавів з вуглецем?
4. Які фази притаманні залізовуглецевим сплавам?
5. На метастабільній ($Fe-Fe_3C$) діаграмі позначити точки, концентрації, температури, структури та фази. Пояснити лінії рівноваги на діаграмі.
6. Які поліморфні перетворення відбуваються в залізі ? Вказати температури.
7. Що таке ферит, аустеніт, цементит, перлит і ледебурит? Вказати їх тип кристалічної ґратки.
8. Описати лінії діаграми $Fe-Fe_3C$ та сутність перитектичного, евтектичного та евтектоїдного перетворень.
9. Як визначити в заданому сплаві при вказаній температурі масову кількість фаз та їх хімічний склад ?
10. Які перетворення проходять при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдному (заевтектоїдному, доевтектичному, евтектичному або заевтектичному) сплаві ?
11. Який цементит називають первинним, вторинним, третинним?
12. Що таке сталь, яким чином вуглець впливає на структуру та властивості сталей в рівноважному стані ?
13. В якому вигляді перебуває вуглець в сталях? Що являє собою цементит?
14. Як впливають кремній і марганець на властивості сталей?
15. Як впливають фосфор і сірка на властивості сталей?
16. Що називають червоноламкістю і холодноламкістю? Які хімічні елементи впливають на ці властивості сталі?
17. На які групи поділяється сталь звичайної якості?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 55

18. Що означають в маркуванні сталі букви кп, пс, сп?
19. Як маркуються якісні вуглецеві сталі: конструкційні і інструментальні?
20. Вміст вуглецю в інструментальних сталях. Як змінюються властивості цих сталей із збільшенням вуглецю в них?
21. Яким чином класифікують вуглецеві сталі в залежності від структури в стані рівноваги ?
22. Класифікація вуглецевих сталей за призначенням. Маркування вуглецевих конструкційних та інструментальних сталей.
23. Із яких сталей можна виготовити: ферму мостового крану, валик, полотно ножівки, пуансон, стамеску, шестерню, пружину тощо ? Назвати марку сталі.

5.4. Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Робота виконується на зразках технічно чистого заліза, відпалених вуглецевих сталей 10, 45, У8. Для визначення твердості використовується прилад ТК-2, для дослідження структури - оптичні мікроскопи МІМ-5 та МІМ-7.

5.5. Вказівки з техніки безпеки

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

5.6. Порядок проведення лабораторної роботи

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

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

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

4. За експериментальними даними побудувати для сталей графік залежності "твердість - вміст вуглецю". Пояснити графік.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 56

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

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

5.7. Зміст звіту

Завдання пункту 4.2, рис. 4.1; схеми мікроструктур досліджених зразків сталей, графік залежності “твердість – вміст вуглецю”; висновки і пояснення; відповідь на питання п.п. 4.6.5 та 4.6.6.

5.8. Рекомендована література

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Потітехніка», 2001. – с. 200-217.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків:Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 125-144.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Лахтин Ю.М.– М.: Металлургия, 1984. – с. 159-166, 180-200.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 121-136, 250-257, 308, 309.
6. Материаловедение /Под ред. В.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – с. 55-61, 139-148, 201-202.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 57

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

МІКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАВУНІВ

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

6.1. Загальні відомості

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

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

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

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

Сірий чавун (ДСТУ 2891-94). У сірих чавунах графіт на площині шліфа має пластинчасту форму. Кристалізація та структурні перетворення в цих чавунах відбуваються відповідно до стабільної діаграми ($Fe-C$) (рис. 6.1). При температурі нижче 1153°C утворюється аустенітно-графітна евтектика, а нижче 738°C - ферито-графітний евтектоїд. Технічні чавуни, окрім заліза та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 58

вуглецю, містять кремній, марганець, алюміній тощо, тобто є багатокомпонентними сплавами, в яких евтектичне та евтектоїдне перетворення відбуваються в інтервалі температур.

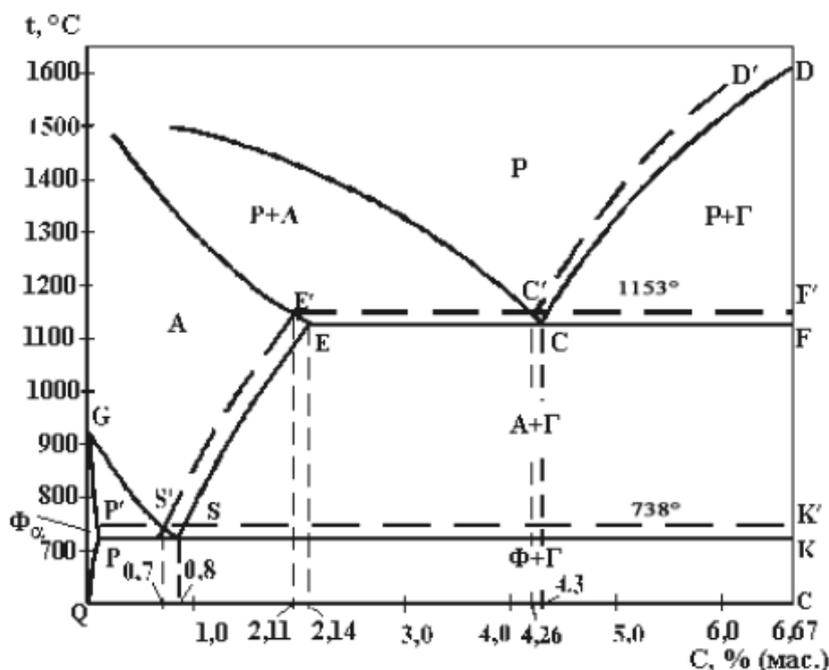


Рис.6.1. Стабільна діаграма стану залізо-графіт (штрихові лінії)

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

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

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

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

ферито-перлітні: структура основи - ферит і перліт. У зв'язаному стані знаходиться $\leq 0,7\%$ вуглецю (в цементиті перліту);

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 59

перлитні: структура основи - перліт. У цих чавунах 0,7% вуглецю знаходиться в цементиті перліту.

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

Присутність у чавунах великої кількості мікронадрізів робить їх малочутливими до концентраторів напружень, шорсткості поверхні деталей. Графіт сприяє утворенню крихкої стружки і тим поліпшує обробку чавунів різанням. Чавуни мають високу демпфірувальну здатність (добре гасять коливання). Крім цього, графіт - гарне мастило, у зв'язку з чим він підвищує антифрикційні властивості чавуну.

Структура металевої основи впливає на границю міцності при стисненні, твердість, зносостійкість, які збільшуються при зростанні кількості перліту. Ферит, навпаки, зменшує міцність та зносостійкість чавунів.

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

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

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

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 60

Високоміцний чавун (ДСТУ 3925-99). Графіт у цих чавунах має глобулярну форму внаслідок модифікування магнієм чи церієм (0,03...0,07%). Така форма графіту сприяє одночасному підвищенню характеристик міцності та пластичності. Відносне видовження високоміцних чавунів у залежності від марки може змінюватися від 2 до 12%. Структура металевої основи високоміцних чавунів може бути феритною, перлітно-феритною або перлітною. Найвища пластичність ($\delta \leq 12\%$) характерна для феритних, а найбільша твердість і міцність ($\sigma_B = 500$ МПа) - для перлітних високоміцних чавунів.

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

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

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

Графітизацій відпал проводять у дві стадії: відливки, запаковані в ящики або завантажені в піч із захисною атмосферою, нагрівають до температури першої стадії 950...1000 °С. На початку ізотермічної витримки структура відливок А+Л+Ц_{II}. Через те, що термодинамічно стабільною є фазова суміш А+Г, а не А+Ц, у процесі витримки внаслідок розчинення Fe_3C флукутаційно з'являються та ростуть зародки графіту. Після завершення першої стадії структура чавуну А+Г.

При охолодженні від 1000 °С надлишок вуглецю виділяється з аустеніту (згідно лінії діаграми **ES**), який нашаровується на графітних частинках чи утворює цементит вторинний. Перетворення останнього ($Fe_3C \rightarrow A+G$) призводить до росту графітних частинок (проміжна стадія).

Чавуни - багатокомпонентні сплави, евтектоїдне перетворення в яких проходить в інтервалі 760...720⁰С. Тому при повільному охолодженні в цьому інтервалі температур або довготривалій ізотермічній витримці при 720⁰С проходить друга стадія графітизації. При цьому можливе перетворення аустеніту в перліт із наступним перетворенням його цементиту на ферит і графіт або безпосереднє перетворення аустеніту на ферито-графітну суміш. В залежності від повноти графітизації на другій стадії внаслідок відпалу

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 61

одержують перліто-феритні або феритні чавуни. Якщо у відливках не відбувається друга стадія - отримують перлітні ковкі чавуни.

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

6.2. Завдання на підготовку до лабораторної роботи

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

6.3. Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до лабораторної роботи

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

6.4. Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Робота виконується на зразках доевтектичного, евтектичного та заевтектичного білих чавунів та чавунів: СЧ 15, ВЧ 600 - 3, КЧ 35-10, КЧ 30-

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 62

6, КЧ 40-3. Для визначення твердості використовується прилад ТК-2, для дослідження структури – оптичні мікроскопи МІМ-5 та МІМ-7.

6.5. Вказівки з техніки безпеки

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

6.6. Порядок проведення лабораторної роботи

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

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

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

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

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

Таблиця 6.6 – Вплив хімічного складу та швидкості охолодження на структуру сірого чавуну

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

6.7. Зміст звіту

Завдання п. 6.2, рис. 6.1, графік графітизаційного відпалення, схеми мікроструктур досліджених зразків чавунів, графік залежності “твердість - кількість перлиту”, табл. 6.6, висновки і пояснення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 63

6.8. Рекомендована література

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Політехніка», 2001. – с. 217-224.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків:Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 147-156.
3. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – с. 203-222.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 144-156.
5. Материаловедение /Под ред. В.Н. Арзамасова. – М.:Машиностроение, 1986. – с. 165-175.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 64

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи – отримати знання про операції термічної обробки при зміцненні та інших змінах властивостей вуглецевої сталі; вивчити взаємозв'язок між вмістом вуглецю в сталі, структурою і механічними властивостями сталі після термічної обробки; навчитись вибирати режим термічної обробки сталі для отримання необхідних експлуатаційних властивостей її.

7.1. Основні відомості по темі роботи

Термічна обробка – сукупність операцій нагріву і охолоджень з метою змінити структуру і властивості сплаву в потрібному напрямку.

Будь – яку операцію термічної обробки можна представити графічно в вигляді графіку в координатах «температура – час», що включає ділянки нагріву, витримки і охолодження. Головні параметри, що визначають результат термічної обробки, - **температура нагріву t_H** , **час витримки τ_B** і **швидкість охолодження $V_{охл}$** (рис. 7.1).

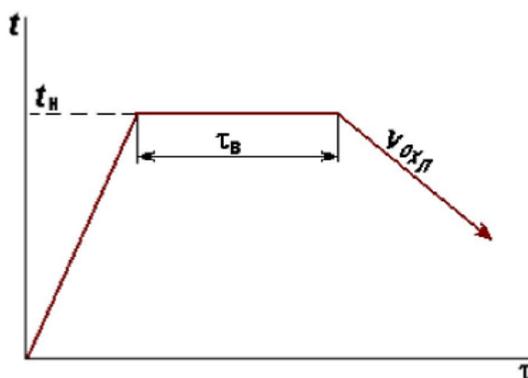


Рис. 7.1. Графічне зображення режиму термічної обробки

Розрізняють **зміцнюючу** термічну обробку, при якій підвищуються твердість, міцність і зносостійкість, і термічну обробку, що понижує показники міцності і підвищує пластичні властивості та в'язкість.

Для сталей широко застосовують обидва варіанти термічної обробки.

Термічна обробка сталі базується на фазових перетвореннях, що відбуваються при її нагріванні вище критичних температур і послідовному охолодженні з різними швидкостями. Завдяки рвзнів розчинності вуглецю в залізі з ОЦК і ГЦК граткою, існує можливість значного зміцнення сталі в результаті її гартування. Перенасичений твердий розчин вуглецю в α – залізі, що отримується при гартуванні, можна піддавати відпуску для отримання

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 65

більш рівноважних структур. При цьому, в залежності від режиму відпуску, можна отримати широкий спектр механічних характеристик сталі, що обумовлює її використання для деталей і конструкцій, що працюють в різних умовах навантажень.

Перетворення при нагріванні сталі

Температури перетворень, або критичні точки, при нагріві сталі прийнято позначати (рис. 6.2):

- початок перетворення фериту в аустеніт ($Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$) - Ac_1 (ці точки розташовані на лінії *PSK*);
- завершення перетворень фериту в аустеніт ($Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$) - Ac_3 (ці точки розташовані на лінії *GS*);
- закінчення розчинення цементиту в аустеніті - Ac_{cm} (ці точки розташовані на лінії *SE*).

Точки A_2 відносяться до магнітного, а не до фазового перетворення.

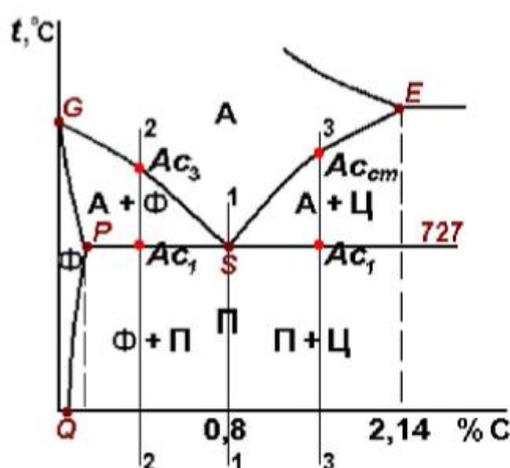


Рис. 7.2. Критичні точки при нагріві сталі

Належить звернути увагу на те, що точки Ac_3 і Ac_{cm} – є індивідуальні для кожної марки сталі, а точка Ac_1 – єдиною спільною для всіх вуглецевих сталей: 727 °С.

Основні види термообробки сталі – *відпал, нормалізація, гартування і відпуск*.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 66

Відпал

Відпал є операцією термічної обробки, що зменшує міцність сталі і надає структурі рівноважного стану.

Відпалом I роду називають нагрів сталі з нерівноважною, в результаті попередньої обробки, структурою до (або нижче) температури фазового перетворення.

Зазвичай причиною появи нерівноважної структури є холодна обробка тиском або швидке охолодження після гарячої обробки. Температурний режим відпалу I роду не пов'язаний з фазовими перетвореннями в сталі.

Мета: Перевести структуру сталі в більш стійкий, рівноважний стан.

Приклад: рекристалізаційний відпал для зняття явища наклепу; низький відпал для покращання оброблюваності різанням.

Відпалом II роду називають нагрів сталі вище температури фазового перетворення з послідувачим повільним охолодженням (разом з піччю).

Мета: Отримати стійкий рівноважний стан (такий як показано на діаграмі).

Різновиди:

1.) **Повний відпал** доєвтектоїдних (конструкційних) сталей виконується з метою повної фазової перекристалізації.

Для цього сталь нагрівають на $30 - 50^\circ$ вище критичної точки A_{c3} (тобто лінії **GS**) і після невеликої витримки повільно охолоджують. Практично деталі охолоджуються разом з піччю з швидкістю $30 - 100^\circ\text{C}/\text{год}$ (рис. 7.3).

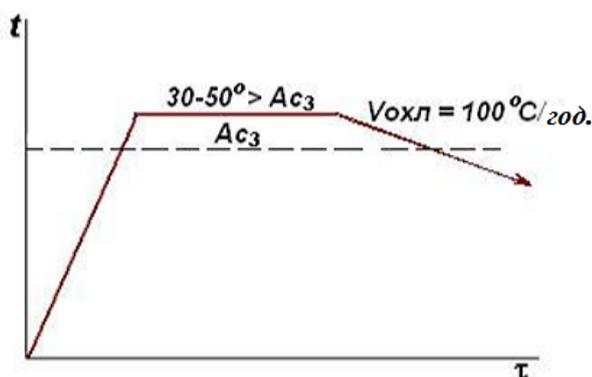


Рис. 7.3. Режим повного відпалу

При нагріванні ферит і перліт доєвтектоїдної сталі перетворюються в аустеніт. Потім, при повільному охолодженні, розпад аустеніту відбувається в верхній частині C – подібної діаграми з утворенням нових зерен фериту і перліту. Таким чином, якщо структура була дефектною (крупні зерна, зерна викривленої форми і т.п.), то при повному відпалі вона виправляється, стає однорідною і дрібнозернистою. Сталь після відпалу має добрі пластичні властивості і низьку твердість. Це забезпечує добру оброблюваність сталі різанням і тиском.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 67

Цей відпал повністю знімає залишкові напруження.

2) *Неповний відпал* заевтектоїдних (інструментальних) сталей виконується з метою отримання структури зернистого перліту. Для цього сталь нагрівають на $30 - 50^\circ$ вище критичної точки A_{c1} (тобто лінії *PSK*). Використовують декілька різних режимів (рис. 7.4).

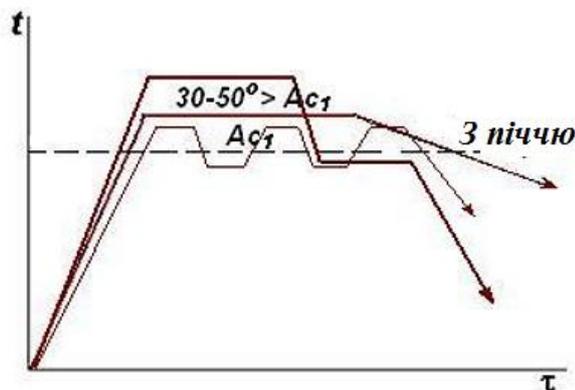


Рис. 7.4. Режим неповного відпалу

В результаті відпалу цементитні пластинки розчиняються не повністю, і при охолодженні отримуються сферичні, а не пластинчасті кристали цементиту. Тому такий відпал називають ще *сфероїдизуючим*. Інструментальні сталі з структурою зернистого перліту є м'якшими і більш пластичними, ніж з пластинчастим перлітом. Цей спосіб відпалу підвищує оброблюваність сталі і покращує її структуру перед гартуванням.

При неповному відпалі доевтектоїдної сталі феритна складова структури не змінюється, оскільки ферит зберігається при нагріві. Тому повного виправлення структури не відбувається.

3) *Дифузійний відпал* сталевих виливків і поковок виконують з метою усунення неоднорідності ливарної або деформованої структури. Усунення мікроліквації досягається за рахунок дифузійних процесів. Тому, щоб забезпечити високу швидкість дифузії, сталь нагрівають до високих температур в аустенітній області (близьких до солідусу). Для сталей це зазвичай температури $1000 - 1200^\circ\text{C}$. При цих температурах виконується тривала витримка (8 – 15 годин) і потім повільне охолодження. Вирівнювання структури сталі покращує механічні властивості, особливо пластичність.

Температурні інтервали нагріву сталі при відпалі показані на рис. 7.5.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 68

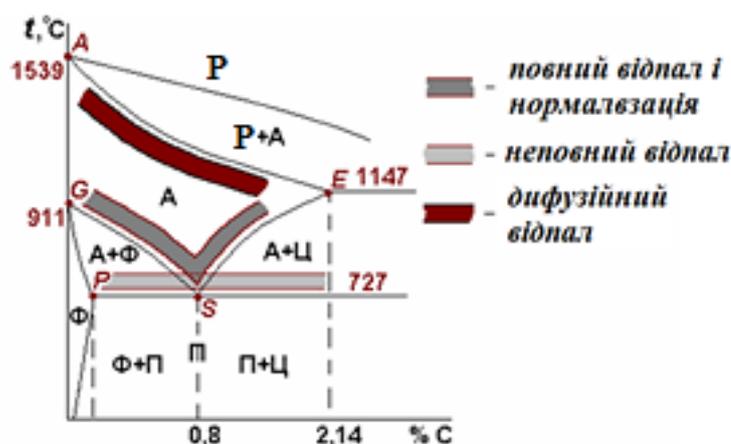


Рис. 7.5. Температурні інтервали нагріву сталі при відпалі

Нормалізація

Нормалізація є різновидом відпалу II роду з прискореним охолодженням.

Нормалізація полягає в нагріві сталі до температур на 50 – 70° вище лінії *GSE* (рис. 7.5) і в охолодженні на повітрі після невеликої витримки. В цьому випадку розпад аустеніту відбувається в верхній частині C – подібної діаграми, але при дещо менших температурах, ніж при відпалі. Це пов'язане з більш швидким охолодженням.

Тому при нормалізації отримується більш дрібна перлітна структура, ніж при повному відпалі. Може навіть утворюватися структура *сорбіт* – більш дрібна, ніж перліт, феритно – цементитна суміш.

Для доевтектоїдних сталей нормалізація часто замінює повний відпал як більш ефективна і економічна операція.

Після нормалізації сталь стає твердішою і міцнішою, ніж після повного відпалу. Мікроструктура також відрізняється від рівноважної: ферит утворює сітку навколо ділянок перліту. (Видається, що в сталі більше вуглецю, ніж є в самому ділі.)

Гартування

Гартування – це операція термічної обробки, яка змінює структуру сталі таким чином, щоб максимально підвищити твердість і міцність.

Гартування полягає в нагріві сталі вище температури фазового перетворення з послідовним достатньо швидким охолодженням (з швидкістю більшою за критичну).

Мета: отримання нерівноважної структури – перенасиченого твердого розчину вуглецю в α – залізі – *мартенситу*. Практична мета – отримання максимально можливої твердості для заданої марки сталі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 69

Швидке охолодження при гартуванні необхідне, щоб вуглець не встиг виділитись з твердого розчину – аустеніту – і залишився б в кристалічній ґратці заліза після охолодження (рис. 7.6).

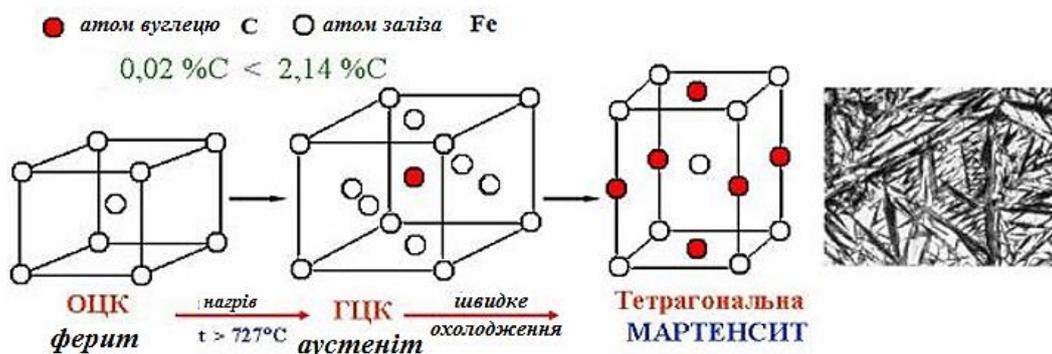


Рис. 7.6. Схема утворення структури загартованої сталі – *мартенсит*

Щоб загартувати сталь, необхідно правильно вибрати температуру нагріву і швидкість охолодження. Ці два параметри є визначними при проведенні гартування. При виборі температури нагріву діє наступне правило: доєвтектоїдні сталі нагрівають під гартування на $30 - 50^{\circ}$ вище критичної точки A_{c3} , а заєвтектоїдні – $30 - 50^{\circ}$ вище точки A_{c1} (рис. 7.7). невеликі перевищення критичної точки необхідне, оскільки в печах для термообробки не уникнути деяких коливань температури відносно заданого значення.

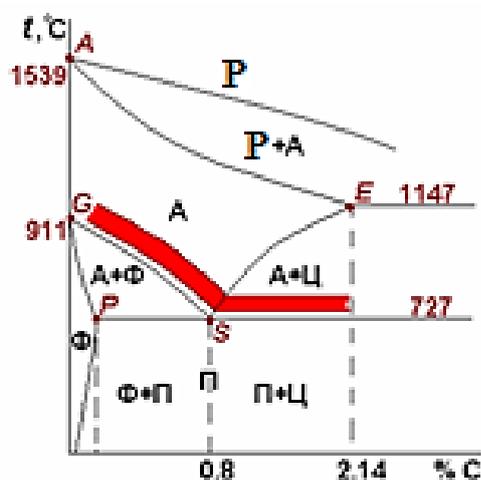


Рис. 7.7. Температурний інтервал нагріву сталі під гартування

Чому температуру під гартування вибирають по-різному для доєвтектоїдних і заєвтектоїдних сталей?

В структурі доєвтектоїдних сталей нижче лінії *GS* присутній ферит. Якщо гартувати сталь з цієї температурної області, то аустеніт перетвориться в твердий і міцний мартенсит, а ферит не зміниться, оскільки він є рівноважною фазою. Оскільки ферит дуже м'який, то його присутність в загартованій сталі понижує її твердість і мета гартування не буде досягнута.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 70

Тому є необхідним нагрів до більш високих температур (вище лінії *GS*), де ферит уже не існує.

Гартування з однофазної (аустенітної) області, з температур вище A_{c3} , називається *повною*. Так гартують доевтектоїдні (конструкційні) сталі.

Для заевтектоїдних сталей такий високий нагрів не потрібний, оскільки вище точки A_{c1} , але нижче лінії *SE* структура складається із аустеніту і цементиту. При гартуванні з цієї області аустеніт перетворюється в мартенсит, а цементит зберігається, оскільки він є рівноважною фазою. Наявність в загартованій сталі такої твердої складової є корисним явищем тому, що тверді дрібні частинки цементиту є додатковими перепонами для руху дислокацій і підвищують твердість та зносостійкість.

Гартування з двофазної області, де є присутніми аустеніт і цементит, або аустеніт і ферит, називається *неповним*. Такому гартуванню піддаються заевтектоїдні (інструментальні) сталі.

Для визначення, до якої групи сталей відноситься матеріал, можна скористатись даними табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Класифікація залізовуглецевих сплавів за структурою

Вміст С, %	Назва сплаву	Структура при кімнатній температурі	Використання сплавів
0.006-0,02	Технічне залізо	$\Phi + \text{Ц}_{III}$	Сердечники трансформаторів
0,02-0,8	Доевтектоїдна сталь	$\Phi + \text{П}$	Деталі машин і конструкцій
0,8	Евтектоїдна сталь	П	Різальний і вимірювальний інструмент
0,8-2,14	Заевтектоїдна сталь	$\text{П} + \text{Ц}_{II}$	
2,14-4,3	Доевтектичний чавун	$\text{П} + \text{Ц} + \text{Л}$	Деталі машин, що отримують литтям
4,3	Евтектичний чавун		
4,3-6,67	Заевтектичний чавун	$\text{Л} + \text{Ц}_I$	Технічного використання не мають

Примітка:

1. В сплавах системи Fe-C розрізняють три види цементиту: Ц_I , Ц_{II} , Ц_{III} (цементит первинний, вторинний, третинний). Ц_I кристалізується із рідкої фази в вигляді кристалів гольчастої форми; спостерігається в структурі заевтектичних чавунів. Ц_{II} і Ц_{III} утворюються при вторинній кристалізації в вигляді сітки по границях зерен аустеніту (Ц_{II}) і фериту (Ц_{III}).

2. Структура доевтектичних конструкційних чавунів складається з металевої матриці (Φ , $\Phi + \text{П}$, П) і графітних включень різної форми (пластинчастої, пластівчастої і кулястої). Наявність в структурі вілоного

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 71

графіту визначає багато експлуатаційних властивостей чавунів (антифрикційність та ін.).

Критична швидкість охолодження при гартуванні вуглецевих сталей складає не менше $400\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. така швидкість досягається при охолодженні в воді або в водних розчинах солей (NaCl) і лугів (NaOH), що збільшують охолоджуючу здатність води. При цьому деталь необхідно енергійно перемішувати в охолоджуючій рідині, щоб видаляти з поверхні металу пузири водяної пари, яка уповільнює охолодження. Критична швидкість зхлздження легованих сталей набагато нижча, тому використовують більш м'яккі охолоджуючі середовища – мінеральні масла або розчини полімерів.

Гартування є найбільш «жорсткою» з усіх операцій термообробки, оскільки сталь піддається різкому зниженню температури. При цьому в деталях виникають великі внутрішні напруження. Вони складаються із термічних напружень, що виникають із-за різниці температур на поверхні і в серцевині деталі при швидкому охолодженні, і структурних напружень, що виникають за рахунок об'ємних змін при мартенситному перетворенні.

Ці напруження можуть призвести до деформації деталі і навіть до появи тріщин. Особливо це є небезпечним у відношенні до деталей складної форми, що мають концентратори напружень у вигляді проточок, отворів, кутів, галтелей і т.п. Для зменшення гартувальних напружень потрібно зменшити перепад температур в процесі охолодження при гартуванні.

По способу охолодження розрізняють:

1) *Безперервне гартування (гартування в одному середовищі)* (рис. 7.8, крива 1). Це найбільш простий спосіб, але при цьому в деталі появляються великі внутрішні напруження.

2) *Гартування в двох середовищах, або переривчасте гартування* (рис. 7.8, крива 2). При цьому способі сталь швидко охолоджується в інтервалі температур $750\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потім деталь переносять в інше, більш м'яке охолоджуюче середовище, і в мартенситному інтервалі охолодження відбувається уповільнено. Це призводить до зменшення внутрішніх напружень і понижує ймовірність появи тріщин. Прикладом такого гартування може бути процес з охолодженням спочатку у воді, а потім у маслі.

3) *Ступінчасте гартування* (рис. 7.8, крива 3), при якому при якому нагріту деталь занурюють в рідке середовище з температурою на $20\text{-}30^{\circ}$ вище точки M_{H} . при цьому забезпечується швидке охолодження сталі в верхній області температур, а потім робиться витримка, під час якої температура по перерізу деталі вирівнюється, і термічні напруження зменшуються. Потім деталі забираються із гартувальної ванни, і подальше їх охолодження відбувається в іншому середовищі, частіш за все на повітрі або в маслі. В цьому випадку мартенситне перетворення відбувається при повільному

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 72

оохолодженні, в умовах менших внутрішніх напружень. В якості рідких середовищ для ступінчастого гартування використовують розплави лугів, селітри, легкоплавких металів.

4) *Ізотермічне гартування* (рис. 7.8, крива 4). Воно суттєво відрізняється від інших способів. Тут витримка в охолоджуючому середовищі при температурі бейнітного перетворення продовжується до повного розпаду аустеніту. У всіх попередніх випадках при гартуванні відбувається утворення мартенситної структури, а в цьому випадку – бейніту.

При ізотермічному гартуванні напруження в деталі мінімальні, виключається утворення тріщин, деформації значно менші. У деяких легованих сталей (пружинних, штампових) цей спосіб гартування дозволяє отримати оптимальне поєднання міцності та пластичності.

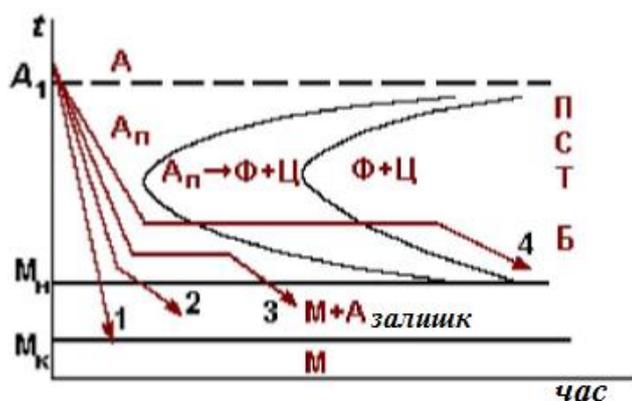


Рис. 7.8. Різновиди гартування за способом охолодження

Таким чином, ступінчасте і переривчасте гартування зменшують гартувальні напруження, оскільки різниця температур на поверхні і в центрі деталі зменшується. Але із-за маленького періоду існування переохолодженого аустеніту у вуглецевих сталях, ступінчасте і ізотермічне гартування частіш за все використовують для легованих сталей.

Можливі *дефекти гартування*:

- а) *перегрів* – крупне зерно;
- б) *перепал* – окислення границь зерен, дуже крупне зерно;
- в) *недогрів* – у доевтектоїдних сталей гартування з інтервалу A_{c1} - A_{c3} приводить до двофазної структури (мартенсит + ферит) і низьким механічним властивостям;

г) *жолоблення і тріщини* – викликаються внутрішніми напруженнями. Питомий об'єм мартенситу більший за питомий об'єм аустеніту, що викликає напруження в структурі сталі. Особливо це є небезпечним для деталей складної форми і при поєднанні структурних напружень з термічними, що виникають із-за різниці температур на поверхні і в центрі деталі.

Щоб уникнути жолоблення, тонкі вироби – пили, ножівкові полотна, бритви – охолоджують заневоленими в спеціальних гартувальних пресах.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 73

З технологією гартування тісно пов'язані два важливих поняття.

Загартованість – це здатність сталі отримувати високу твердість при гартуванні. Вона залежить від вмісту вуглецю в сталі і характеризується максимально можливою твердістю (HRC) для заданої марки.

Прогартуваність – це здатність сталі отримувати загартований шар визначеної глибини. Швидкість охолодження зменшується від поверхні деталі до центру, тому при великій товщині може трапитись, що в її серцевині швидкість охолодження є меншою за критичну (рис. 7.9). В цьому випадку на мартенсит загартується тільки поверхневий шар деталі, а серцевина буде незагартована, з м'якою феритно-перлітною структурою.

Для характеристики прогартуваності сталі в довідниках наводять величину критичного діаметру. *Критичний діаметр* – це максимальний діаметр циліндричного прутка, який прогартується наскрізь в конкретному середовищі охолодження.

Чим більша прогартуваність сталі, тим краще. Вуглецева сталь при охолодженні в воді має критичний діаметр всього 10-15 мм. Прогартуваність сталі залежить від вмісту легуючих елементів, які затрудняють дифузійний розпад аустеніту, зменшуючи тим самим критичну швидкість охолодження при гартуванні. Чим більше легуючих елементів в сталі, тим вища її прогартуваність.

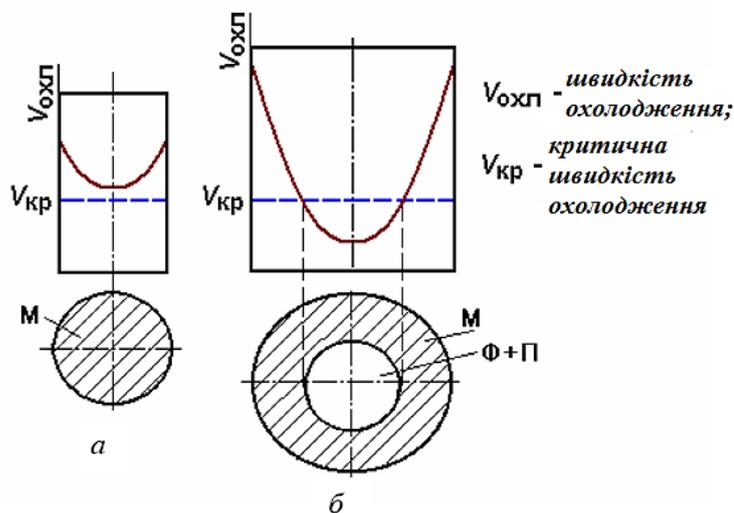


Рис. 7.9. Зміна швидкості охолодження по перерізу деталей:
а – малого діаметру; б – великого діаметру

Відпук

Загартована сталь дуже тверда, але вона також і крихка, у неї низька пластичність і великі внутрішні напруження. В такому стані деталь є не дієздатною. Тому для зменшення внутрішніх напружень і підвищення

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 74

пластичності після гартування завжди слідує ще одна операція термічної обробки, яка називається **відпуск**.

Відпуск – це нагрів загартованої сталі до температур нижче критичних з послідовним охолодженням, зазвичай на повітрі.

Мета відпуску – створення потрібного комплексу експлуатаційних властивостей сталі, отримання більш стійкої, ніж після гартування, структури, шляхом зменшення внутрішніх напружень.

Відпуск – остання операція в технологічному ланцюгу термообробки сталі, тому отримана при відпуску структура повинна забезпечувати властивості, необхідні при роботі деталі.

В процесі відпуску відбувається розпад мартенситу за рахунок виділення з нього вуглецю, тим більш повний, чим більша температура і час витримки. Тому зменшуються внутрішні напруження і щільність дислокацій. Залишковий аустеніт при відпуску перетворюється в мартенсит.

По температурі нагріву відпуск підрозділяється на 3 види: низький, середній і високий (табл. 7.2).

Таблиця 7.2 – Види відпуску вуглецевих сталей

Вид відпуску	$t, ^\circ\text{C}$	Структура	<i>HRC</i>	Мета	Використання
Низький	150-300	Мартенсит відпуску	55-65	Забезпечення високої твердості і зносостійкості	Різальний і вимірювальний інструмент, сталі з 0,7—1,3 % С
Середній	300-500	Троостит відпуску	30-45	Забезпечення високої границі текучості	Пружини, ресори і конструкційні сталі з 0,5- 0,7 %С
Високий	500-650	Сорбіт відпуску	25-35	Забезпечення оптимального поєднання міцності, ударної в'язкості і пластичності	Деталі машин із конструкційних сталей з 0,3- 0,5 %С

При **низькому відпуску** (150-300 °С) із мартенситу виділяється частина надлишкового вуглецю з утворенням дрібних карбідних частинок. Але оскільки швидкість дифузії тут ще мала, деяка частина вуглецю в мартенситі залишається.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 75

Така структура являє собою маловуглецевий мартенсит і дуже дрібні карбідні частинки. Її називають **відпущений мартенсит**.

В результаті низького відпуску зменшуються внутрішні напруження, дещо збільшуються в'язкість і пластичність, твердість майже не знижується. Деталі можуть працювати в умовах, де необхідна висока твердість і зносостійкість.

Низький відпуск використовують для різального інструменту, деталі підшипників кочення.

Середній відпуск проводиться при більш високих температурах (300-450 °С). При цьому із мартенситу уже виділяється весь надлишковий вуглець з утворенням цементитних частинок. Тетрагональні викривлення кристалічної ґратки заліза знімаються, вона стає кубічною. Мартенсит перетворюється в феритно-цементитну суміш з дуже дрібними, в вигляді голок, частинками цементиту, яка називається **трооститом відпуску**.

Середній відпуск ще більш зменшує внутрішні напруження, збільшує в'язкість, при цьому міцність залишається високою, а границя текучості і границя витривалості досягають максимуму. Такому відпуску піддають ресори, пружини та інші елементи, а також штамповий інструмент.

В інтервалі температур 500-650 °С швидкість дифузійних процесів дещо зростає, що при розпаді мартенситу утворюється феритно-цементитна суміш з більш крупними, сферичними формами, зернами цементиту. Такий відпуск називають **високим**; структура, що отримується – **сорбіт відпуску**.

В результаті високого відпуску дуже зростають в'язкість і пластичність сталі, внутрішні знімаються майже повністю, твердість і міцність знижуються, але все ж залишаються достатньо високими.

Гартування з високим відпуском називається **термічним покращанням** сталі. Такий обробці піддають деталі машин, що працюють в умовах знакозмінних і ударних навантажень: вали, важелі, шестерні і т.п.

Час витримки при низькому відпуску складає від 1 до 12-15 годин, оскільки при таких низьких температурах дифузія вуглецю відбувається повільно. Для середнього і високого зазвичай достатньо 1-2 години.

Зміна механічних характеристик вуглецевої сталі при відпуску показано на рис. 7.10 і в табл. 7.3.

Таким чином, з підвищенням температури і довготривалості відпуску зростають пластичні властивості сталі, але знижуються її твердість і міцність. В практиці термічної обробки сталі режим відпуску призначають у відповідності необхідними властивостями, які визначаються умовами роботи деталі.

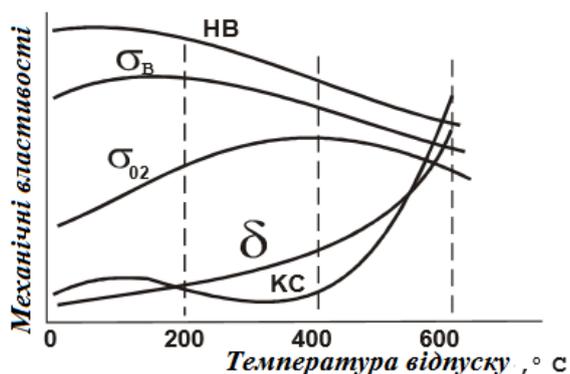


Рис. 7.9. Залежність механічних характеристик сталі від температури відпуску: *HB* – твердість по Брінеллю; σ_B – границя міцності; σ_T – границя текучості; δ – відносне видовження; *КС* – ударна в'язкість

Таблиця 7.3 – Вплив термічної обробки на механічні властивості сталі з 0,45%С

Термічна обробка	σ_B	σ_{02}	δ	ψ	<i>KCU</i> , МДж/м ²	<i>HB</i>
	МПа		%			
Вілпал	650	450	20	65	0,6	187
Нормалізація	730	470	21	60	0,8	198
Гартування і відпуск при 500 °С	970	850	8	55	1,0	280
Гартування і відпуск при 550 °С	950	800	10	60	1,1	269
Гартування і відпуск при 600 °С	870	700	13	65	1,3	255

Поверхнєве зміцнення

Для деяких деталей при експлуатації необхідна висока твердість і зносостійкість поверхні в поєднанні з високою в'язкістю в серцевині. Це стосується деталей, що працюють в умовах зношення з одночасною дією динамічних навантажень (наприклад, шестерні, пальці, ланки траків гусеничних машин).

В таких випадках піддають зміцненню не всю деталь, а тільки тонкий (декілька мм) поверхневий шар.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 77

Поверхнєве гартування – це нагрів до гартувальних температур тільки поверхневого шару деталі з послідуєчим швидким охолодженням і утворенням мартенситної структури тільки в цьому шарі.

Здійснюють таке гартування швидким нагрівом поверхні, при якому серцевина не встигне прогрітись за рахунок теплопровідності. При такому нагріванні температура по перерізу деталі різко падає від поверхні до центру.

Після охолодження в перерізі деталі утворюються три характерні зони з різною структурою і властивостями (див. рис. 7.11).

В зоні I після гартування отримується мартенситна структура з максимальною твердістю, оскільки ця зона нагрілась вище критичної точки A_{c3} .

В зоні II після гартування в структурі, крім мартенситу, буде присутній і ферит. Як наслідок, твердість там буде нижча.

В зоні III нагрів і охолодження не приводять до будь-яких змін в структурі. Значить, тут зберігається вихідна ферито-перлітна структура з низькою твердістю, але з високими пластичними властивостями.

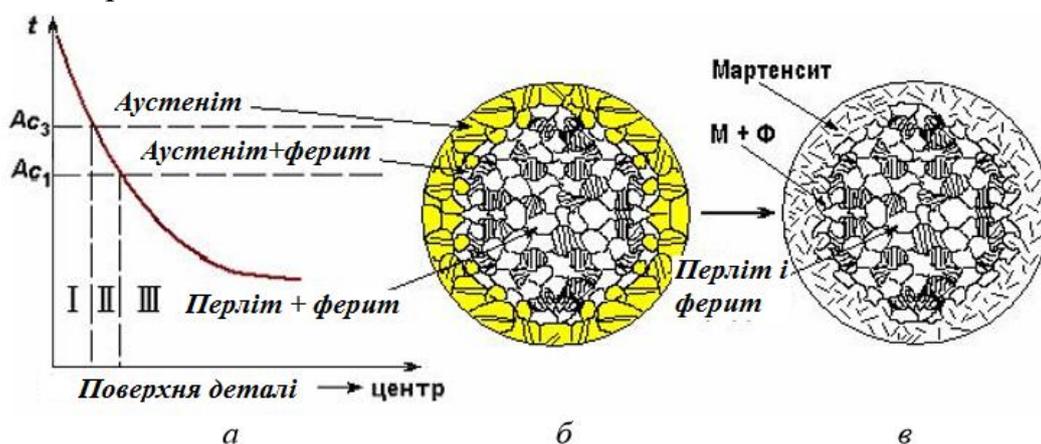


Рис. 7.11. Поверхнєве гартування сталі:

a – розподіл температур по перерізу; *б* – структура при поверхневому нагріві; *в* – структура після гартування

Після поверхневого гартування деталь може чинити опір динамічним навантаженням за рахунок в'язкої серцевини і добре працює в умовах зношення завдяки твердій поверхні.

Швидкий нагрів поверхні, що необхідний при такій технології, зазвичай виконується індукційним способом (гартування струмами високої частоти). Деталь поміщається в індуктор, що підключається до генератора високої частоти. Змінне магнітне поле високої частоти наводить в тонкому поверхневому шарі вихрові струми, і нагрів здійснюється за рахунок опору металу протіканню цих струмів. Швидко, після нагріву, який протікає секунди, деталь поміщають в спреєр для охолодження.

Поверхнєве гартування повинно супроводжуватись низьким відпуском.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 78

Чим вища частота зовнішнього змінного магнітного поля, тим тонший шар, в якому зосереджені вихрові струми. Тому глибина загартованого шару може легко регулюватись і складає від десятих долей міліметра до 3-5 мм. Цю операцію можна повністю автоматизувати. Спосіб дуже продуктивний; жолоблення і окислення поверхні деталі при цьому є мінімальним.

Іноді для поверхневого гартування використовують і інші способи нагріву: газополуменевий, лазерний, в розплавах солей, в електролітах.

Для такого способу термообробки спеціально створені сталі пониженої прогартуваності, наприклад, 55ПП (0,55%С і не більше 0,5% домішок)

7.2. Завдання

1. Використовуючи діаграму стану Fe-C, визначити температуру повного і неповного гартування для сталі 40.

Опишіть структуру і властивості сталі після кожного виду термічної обробки.

2. Що називають операцією «відпал»? Використовуючи діаграму стану залізо – цементит, призначте температуру відпалу для сталей 35 і У10.

Опишіть перетворення, що відбуваються в сталях при вибраному режимі обробки і яку структуру і властивості вона при цьому набуває.

3. Різальний інструмент із сталі У12 був перегрітий при гартуванні. Чим шкідливий перегрів, і як можна виправити цей дефект?

Призначте режими термічної обробки для виправлення структури, що забезпечує нормальну роботу інструменту.

Опишіть структуру і властивості сталі після правильної термообробки.

4. Використовуючи діаграму стану залізо – цементит і графік залежності твердості від температури відпуску, призначте режим термічної обробки (температуру гартування, середовище охолодження і температуру відпуску) втулок із сталі 45, які повинні мати твердість *HRC28-30*.

Опишіть перетворення, що відбуваються на всіх етапах термічної обробки, і структуру, яку набуде сталь при цьому.

5. За допомогою діаграми залізо – цементит визначте температуру нормалізації, відпалу і гартування для сталі 30.

Охарактеризуйте ці режими термічної обробки і опишіть структуру і властивості сталі після кожного виду обробки.

6. Після гартування вуглецевої сталі була отримана структура, що складається з фериту і мартенситу.

Проведіть на діаграмі стану залізо – цементит приблизну ординату, що відповідає складу заданої сталі, вкажіть прийняту в даному випадку температуру нагріву під гартування.

Як називається така обробка? Які перетворення відбуваються при нагріві і охолодженні?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 79

7. Сталь 40 гартується від температур 760 і 840 °С. Укажіть на діаграмі стану залізо – цементит вибрані температури нагріву і опишіть перетворення, що відбуваються при обох режимах гартування.

Якому режиму належить віддати перевагу і чому?

8. Вуглецеві сталі 45 і У8 після гартування і відпуску мають структуру мартенсит відпуску. Твердість першої *HRC 50*, другої – *HRC60*.

Використовуючи діаграму стану залізо – цементит і враховуючи перетворення, що відбуваються в цих сталях при відпуску, вкажіть температуру гартування і температуру відпуску для кожної сталі.

Опишіть перетворення, що відбуваються в цих сталях в процесі гартування і відпуску, і поясніть, чому сталь У8 має більшу твердість, ніж сталь 45.

9. Виріб із сталі 50 потрібно піддати покращанню.

Призначте режим термічної обробки, опишіть суть перетворень, що відбуваються при цьому, також структуру і властивості сталі після обробки.

10.Що називають термічною операцією «нормалізація»?

Використовуючи діаграму стану залізо – цементит, призначте температуру нормалізації будь – якої доевтектоїдної сталі.

Опишіть перетворення, що відбуваються в сталі при вибраному режимі обробки, а також структуру і властивості, які вона набуває при цьому.

11. На виробках із сталі 20 потрібно отримати поверхневий шар високої твердості. Виберіть спосіб хіміко-термічної обробки і обґрунтуйте вибір.

Яка структура буде на поверхні сталі і в серцевині після кінцевої термообробки?

12.Необхідно провести поверхнєве зміцнення виробів із сталі 15.

Призначте вид обробки, опишіть технологію, перетворення, що відбуваються в сталі, структуру і властивості поверхні і серцевини виробу.

13. Валики із сталі 40 загартовані: один від температури 760 °С, а другий – від температури 840 °С.

Нанесіть вибрані температури нагріву на діаграму стану залізо – цементит і поясніть, який з цих валиків має більш високу твердість та кращі експлуатаційні властивості і чому.

14. В структурі вуглецевої сталі 30 після гартування залишковий аустеніт не виявлений, а в структурі сталі У12 виявлено 3% залишкового аустеніту. Поясніть причину цього явища. Як можна усунути залишковий аустеніт?

15. Як можна усунути крупнозернисту структуру в кований сталі 30?

Використовуючи діаграму стану залізо – цементит, обґрунтуйте вибір режиму термічної обробки для виправлення структури. Опишіть структурні перетворення і зміну властивостей сталі.

16. Шестерні із сталі 45 загартовані: перша – від температури 750 °С, а друга – від 850 °С.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 80

Нанесіть вибрані температури на діаграму стану залізо – цементит, і поясніть, яка з цих шестерень має більш високу твердість і кращі експлуатаційні властивості і чому.

17. В чому переваги і недоліки поверхневого зміцнення сталей виробів при нагріві струмами високої частоти в порівнянні зі зміцненням методом цементації? Назвіть марки сталі, що використовують для цих видів обробки.

18. Для яких сталей використовують відпал на зернистий перліт? Поясніть вибір режиму і мету цього виду обробки.

19. Накресліть діаграму ізотермічного перетворення аустеніту для сталі У8. Нанесіть на неї криву режиму ізотермічної обробки, що забезпечує твердість *HB 150*. Вкажіть, як цей режим називається, і яка структура отримується в даному випадку.

20. Після термообробки вуглецевої сталі отримана структура цементит в мартенсит відпуску. Нанесіть на діаграму стану залізо – цементит приблизну ординату заданої сталі і обґрунтуйте вибір температури нагріву цієї сталі під гартування. Укажіть температуру відпуску і опишіть перетворення, які відбудуться при термообробці.

21. При безперервному охолодженні сталі У8 отримана структура троостит. Нанесіть на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту криву охолодження, що забезпечує отримання заданої структури. Укажіть температурний інтервал перетворень і опишіть його характер.

22. Використовуючи діаграму стану залізо – цементит, визначте температури нормалізації, відпалу та гартування для сталі 50. Охарактеризуйте ці режими термообробки і опишіть структуру і властивості сталі після кожного виду обробки.

23. Вуглецеві сталі 35 і У8 після гартування і відпуску мають структуру мартенсит відпуску. Твердість першої *HRC 45*, другої – *HRC 60*.

Використовуючи діаграму стану залізо – цементит і враховуючи перетворення, що відбуваються в цих сталях при відпуску, вкажіть температуру гартування і температуру відпуску для кожної сталі.

Опишіть перетворення, що відбуваються в цих сталях в процесі гартування і відпуску, і поясніть, чому сталь У8 має більшу твердість, ніж сталь 35.

24. Використовуючи діаграму стану залізо – цементит визначте температуру повного та неповного відпалу і нормалізації для сталі 20. Охарактеризуйте ці режими термічної обробки і опишіть структуру і властивості сталі в кожному випадку.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 81

7.3. Рекомендована література

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Політехніка», 2001. – с. 217-224.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків:Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 147-156.
3. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – с. 203-222.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 144-156.
5. Материаловедение /Под ред. В.Н. Арзамасова. – М.:Машиностроение, 1986. – с. 165-175.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 82

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

СПЛАВИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

Мета роботи – отримати знання про сплави на основі алюмінію, міді, титану та інших кольорових металів; ознайомитись з можливостями термічної обробки кольорових металів; засвоїти маркування сплавів; засвоїти основи вибору сплавів з необхідними властивостями для конкретних умов експлуатації.

8.1. Основні відомості по темі роботи

Сталь – майже ідеальний металічний матеріал, але вона має суттєвий недолік: деталі і конструкції, виконані навіть з високоміцної сталі, є важкими. В багатьох галузях техніки, особливо в літакобудуванні, необхідні такі ж міцні, але більш легкі матеріали. Легкими прийнято вважати всі метали і сплави, щільність яких складає менше половин щільності заліза, тобто не перевищує $3,5 \text{ г/см}^3$. До них відносяться алюміній Al ($\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$), магній Mg ($\gamma = 1,74 \text{ г/см}^3$), берилій Be ($\gamma = 1,82 \text{ г/см}^3$). Найбільше використання з цих металів в якості конструкційного матеріалу має алюміній.

Алюміній і його сплави

Алюміній – срібно-білий метал з матовим відтінком. Кристалічна ґратка алюмінію – гранецентрований куб з періодом $a = 0,4041 \text{ нм}$. Поліморфних перетворень алюміній не має. Температура плавлення – $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Чистий відпалений алюміній має низьку міцність: $\sigma_b = 50\text{--}60 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 15\text{--}20 \text{ МПа}$, твердість 20–25 НВ, але пластичність у нього висока: видовження при руйнуванні складає 30–50 %, відносне звуження – 80–95 %.

Чистий алюміній використовують в електротехніці для виготовлення провідників струму, його електропровідність $37,6 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$. Він поступається тільки сріблу з провідністю $63,0 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$ і міді – $60,1 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$. Всі домішки, що присутні в алюмінії (постійними є Fe і Si), погіршують його тепло- і електропровідність. Алюміній є стійким до корозії на повітрі, а також в середовищі багатьох газів і рідин завдяки захисній дії щільної плівки оксиду Al_2O_3 . Чим чистіший метал, тим вища його корозійна стійкість.

Алюміній допускає глибоку витяжку, добре зварюється газовим і контактним зварюванням, погано оброблюється різанням, має низькі ливарні властивості.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 83

Із алюмінію високої чистоти отримують фольгу для електричних конденсаторів. Струмopровідні деталі виготовляють з алюмінію технічної чистоти.

Основна маса алюмінію витрачається на виробництво алюмінієвих сплавів. Границя міцності алюмінієвих сплавів досягає 500–700 МПа при щільності не більше 2,85 г/см³. По питомій міцності деякі алюмінієві сплави відповідають високоміцним сталям: $\sigma_b/(\rho \cdot g) = 23$.

В залежності від способу виготовлення деталей і виробів сплави алюмінію поділяють на деформовані і ливарні.

Деформовані сплави легко піддаються обробці тиском і призначені для прокатування, кування, пресування. Ливарні сплави відрізняються рідкотекучістю, добре заповнюють форму, малочутливі до ливарних тріщин; їх використовують для виготовлення фасонних виливок за допомогою лиття в земляні або металічні форми.

Деформовані сплави, в залежності від хімічного складу, поділяють на сплави з природною твердістю, тобто ті, що не піддаються зміцненню термічною обробкою, і такі, що термічно зміцнюються. Сплави, що термічно не зміцнюються, містять мало легуючих елементів і використовуються замість чистого алюмінію в тих випадках, коли його міцність недостатня. Вони леговані магнієм в кількості 0,5–5 %, а також марганцем (до 1,2 %). Їх міцність можна підвищити шляхом холодної обробки тиском (явище наклепу). Наприклад, деформований алюмінієвий сплав АМг3 (≈ 3 % Mg) в відпаленому стані має міцність на розтяг 180 МПа і видовження 15 %, при невеликому наклепі – 230 МПа і 8 %, після сильного наклепу – 260 МПа і 3%. Як показують ці дані, в результаті холодної деформації міцність сплаву зростає, а пластичність знижується.

Ці сплави призначені для роботи в корозійних середовищах, оскільки як і марганець, і магній збільшують корозійну стійкість алюмінієвих сплавів.

Використовують сплави, що не зміцнюються термічною обробкою, для виготовлення віконних рам вагонів, кузовів автомобілів, трубопроводів для бензину і масла, зварних баків и т. п.

Велика частина деформованих алюмінієвих сплавів – це сплави, що термічно зміцнюються. Міцність їх зростає в результаті дисперсійного твердіння, або старіння, після гартування. Це багатокomпонентні сплави, в які входять різні елементи для підвищення міцності (Cu, Mg, Zn), жароміцності (Fe), антикорозійних властивостей (Mn, Mg). Хімічний склад деяких алюмінієвих сплавів, що зміцнюються термічною обробкою, наводяться в табл. 8.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 84

Таблиця 8.1 – Хімічний склад алюмінієвих сплавів, що термічно зміцнюються (ГОСТ 4784 – 97)

Сплав	Марка	Хімічний склад, %							
		Cu	Mg	Si	Zn	Fe	Mn	Ni	Cr
Дюралюміні	Д1	3,8-4,8	0,4-0,8	<0,7	<0,3	<0,7	0,4-0,8	<0,1	-
	Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	<0,5	<0,3	<0,5	0,3-0,9	0,1	-
	Д18	2,2-3	0,2-0,5	0,8	0,25	0,7	0,2	-	0,1
Авіаль	АВ	0,2-0,6	0,45-0,9	0,5-1,2	<0,2	<0,5	0,15-0,3	-	-
Кувальні	АК6 (АК8)	1,8-2,6	0,4-0,8	0,7-1,2	<0,3	<0,7	0,4-0,8	<0,1	-
Жароміцні	АК2 (АК4)	3,5-4,5	0,4-0,8	0,5-1	<0,3	0,5-1,0	<0,2	1,8-2,3	-
Високміцні	В95	1,4-2,0	1,8-2,8	-	5-7	-	0,2-0,6	-	0,1-0,25

Типовим представником цих сплавів є дюралюміні, в яких основний легуючий елемент – мідь. Діаграма стану – алюміній – мідь наведена на рис. 8.1.

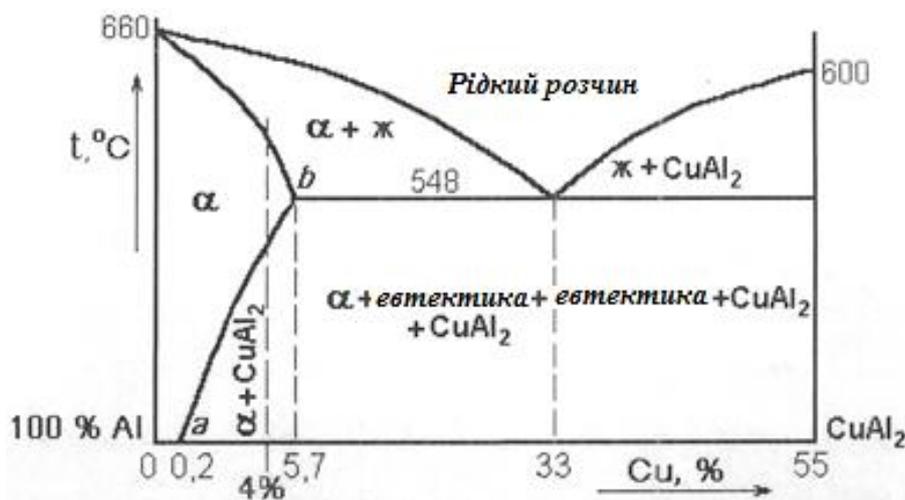


Рис. 8.1. Діаграма стану алюміній – мідь

На діаграмі видно, що алюміній в твердому стані здатний розчиняти в собі певну кількість міді, причому її розчинність максимальна при 548 °С. Твердий розчин при цій температурі містить 5,7 % Cu. З пониженням температури розчинність міді швидко зменшується: при кімнатній температурі вона складає 0,2 %. Структура алюмінієвого сплаву з 4 % Cu в рівноважних умовах складається з кристалів твердого розчину, містить дуже мало міді, і кристалів інтерметаліду CuAl₂. Міцність такого сплаву невелика (≈140 МПа).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 85

Термічне зміцнення здійснюється в два етапи.

На першому етапі сплав нагрівають під гартування до такої температури, при якій досягається максимальна розчинність міді: вище лінії граничної розчинності *ab*, але нижче солідуса. При цьому хімічне з'єднання розчиняється, і утворює однорідний твердий розчин α з концентрацією міді 4 %. Швидке охолодження, зазвичай у воді, попереджує виділення CuAl_2 , тобто в результаті гартування фіксується структурний стан сплаву, досягнутий при високій температурі. Атоми міді залишаються в перенасиченому (переохолодженому) твердому розчині. Цей пересичений твердий розчин при кімнатній температурі є нестійкою фазою, з підвищеним запасом вільної енергії, пов'язаної з викривленнями с кристалічної ґратки алюмінію атомами міді. Вся мідь понад рівноважної концентрації 0,2 % буде намагатись виділитись із твердого розчину.

Другий етап термічного зміцнення полягає в тому, що з отриманого при гартуванні твердого розчину поступово, з часом, виділяється мідь, утворюючи дисперсні частинки хімічного з'єднання CuAl_2 . В цьому і полягає старіння сплаву.

Старінням сплавів називають процеси розпаду твердого розчину, що відбуваються самовільно в попередньо загартованому сплаві і які приводять до зміни структури і властивостей протягом певного часу. Природне старіння відбувається при кімнатній температурі протягом декількох діб (від 4 до 7). Штучне старіння (при підвищених температурах) відбувається значно швидше, протягом декількох годин і навіть хвилин, і дає найвищі результати. Дисперсні частинки, що виникають в твердому розчині в процесі витримки після гартування, перешкоджають ковзанню дислокацій при деформуванні, тому міцність і твердість сплаву зростають. Міцність дуралюмінію після природного старіння складає близько 400 МПа, тобто майже вдвічі більше ніж у відпаленого. Штучне старіння проводять при температурах 150–170 °С.

Все інші алюмінієві сплави, представлені в табл. 7.1, зміцнюються такою ж термічною обробкою – гартуванням і старінням. Відмінність полягає тільки в виборі режиму. Механічні характеристики зміцнених алюмінієвих сплавів наведені в табл. 8.2.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 86

Таблиця 8.2 – Механічні властивості деформованих алюмінієвих сплавів

Сплав	Вид напівфабрикату	Механічні властивості				
		σ_{ϵ}	σ_{02}	σ_{-1} ($5 \cdot 10^6$ циклів)	$\delta, \%$	<i>НВ</i>
		МПа				
Д1*	Листи	400	240	105	20	95
	Пресовані прутки	480	320	125	14	-
Д16*	Листи	440	330	115	18	105
	Пресовані прутки	530	400	140	11	-
Д18*	Дріт	300	170	95	24	70
В95**	Листи	540	470	150	10	150
	Пресовані прутки	600	560	150	8	150
АК6**	Поковки	400	299	125	12	100
АК8**	Поковки	480	380	130	9	135

* Механічні властивості після гартування і природного старіння

** Механічні властивості після гартування і штучного старіння

Ливарні алюмінієві сплави повинні чати вузький температурний інтервал кристалізації для отримання щільного виливка, тобто ці сплави, близькі за складом до евтектики або евтектичні. На практиці широкого використання набули ливарні сплави систем Al–Cu, Al–Zn, Al–Si. Найкращі ливарні властивості мають сплави системи алюміній – кремній, які за складом близькі до евтектичних. Ці сплави називаються **силуміном**. Маркуються ливарні алюмінієві сплави буквами АЛ (алюмінієвий ливарний) і кодовою цифрою, що визначає хімічний склад сплаву, наприклад: АЛ2, АЛ4.

Звичайний силумін АЛ2 є заевтектичним сплавом, що містить 12–13 % Si (рис. 8.2). Після кристалізації структура цього сплаву являє собою крупні світлі включення надлишкового кремнію і грубогольчасту евтектику. Сплав з такою структурою має низькі механічні властивості: міцність складає 100 – 120 МПа, а відносне видовження при розтягу – 3 – 5 %. Тільки шляхом модифікування натрієм або сумішшю NaF і NaCl вдається отримати дрібнозернисту евтектику зі значно більш дрібними кристалами кремнію. Це приводить до значного підвищення механічних властивостей: $\sigma_B = 180 - 200$ МПа і $\delta = 6 - 8\%$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 87



Рис. 8.2. Діаграма стану алюміній – кремній

Подвійні алюмінієво-кремнієві сплави мають дуже високу рідкотекучість, тому із них виготовляють фасонні виливки складної форми, які не потребують високих механічних властивостей. Для підвищення експлуатаційних і механічних властивостей (виливки для навантажених авіаційних двигунів, литі деталі, які призначені для роботи при температурах 250–300 °С і т. п.) сплави легують магнієм, міддю, марганцем, нікелем або піддають термічній обробці – гартуванню в воду і штучному старінню. При цьому границя міцності може досягати 240–260 МПа при відносному видовженні 20–18 %.

Леговані силуміни можуть бути використаними для виготовлення корпусів компресорів, картерів, головок циліндрів (АЛ9), деталей, що працюють в умовах високої вологості, в судно- і літакобудуванні (АЛ8, АЛ27).

Мідь і її сплави

Мідь – дійсно «кольоровий» метал: її колір може змінюватись від світло-розового до червоного. Мідь має гранецентровану кубічну ґратку з параметром $a = 0,361$ нм. Поліморфних перетворень у міді нема; температура плавлення 1083 °С. Мідь має високу технологічність: добре паяється, зварюється, легко оброблюється тиском. В відпаленому стані границя міцності невелика і складає 200–250 МПа при відносному видовженні близько 40–50 %.

Головними відмінними характеристиками міді є висока теплопровідність і електропровідність, пластичність і корозійна стійкість. Але також, як і у алюмінію, домішки негативно впливають на властивості міді. В залежності від вмісту домішок розрізняють наступні марки міді (ГОСТ 859–78): М00 (99,99 % Cu), М0 (99,97 % Cu), М2 (99,7 % Cu). Завдяки високій електропровідності мідь знайшла широке застосування в електротехніці. З міді виготовляють шини, стрічки, кабелі, рубильники, обмотки електродвигунів і т. п. Домішки понижують електропровідність,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 88

особливо ті, що утворюють з міддю тверді розчини: фосфор, миш'як, алюміній, олово. Друга основна властивість міді – висока теплопровідність. Тому мідь використовують в металургії в ливарному виробництві для водоохолодження тиглів, кристалізаторів, піддонів і виливниць.

Шкідливими домішками міді також є вісмут і свинець. Вони практично не розчиняються в міді, а утворюють легкоплавкі евтектики (з температурою плавлення 326 °С і 270 °С відповідно) і створюють червоноламкість при гарячому прокатуванні міді.

На механічні властивості міді домішки впливають незначно; в більшій мірі властивості залежать від стану (литий, деформований і т. п.). Для підвищення міцності мідь легують цинком, алюмінієм, оловом, нікелем, залізом або піддають холодній пластичній деформації. При цьому її міцність може зростати до 380–450 МПа при зменшенні електропровідності на 3–5 %.

Мідні сплави, також як і сплави більшості кольорових металів, за технологічними властивостями поділяються на деформовані (які використовуються при виробництві напівфабрикатів: листів, стрічок, дроту і інших профілів) і ливарні (які використовуються для виробів, що отримують шляхом відливання за різними технологіями). За здатністю зміцнюватись за допомогою термічної обробки мідні сплави діляться на ті, що зміцнюються і на ті, що не зміцнюються термічною обробкою. За хімічним складом мідні сплави поділяються на дві основні групи: латуні і бронзи.

Сплави міді з цинком носять назву латуней. Спеціальні (багатокомпонентні) латуні містять і інші легуючі елементи, такі як алюміній, нікель, марганець. Маркуються подвійні латуні наступним чином: на початку ставиться буква Л («латунь»), а потім цифра, що показує вміст міді в процентах. В спеціальних латунях після букви Л ідуть букви українського алфавіту, що позначають легуючий елемент: А – Al, Н – Ni, К – Si, С – Pb, О – Sn, Ж – Fe, Мц – Mn, Ф – P, Б – Be. Після букв ставляться цифри, що показують середній вміст міді і легуючих елементів в процентах (см. табл. 8.3).

Введення тих чи інших легуючих елементів підвищує механічні і антикорозійні властивості латуні.

Мідь з цинком утворює багато твердих розчинів, що є очевидним із діаграми стану Cu–Zn (рис. 8.3).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 89

Таблиця 8.3 – Хімічний склад і механічні властивості деформованих латуней після відпалу (ГОСТ 15527 – 70)

Марка латуні	Мідь	Інші елементи	σ_6	σ_{02}	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²	НВ
	% (мас.)		МПа		%			
Л90	88-91	-	260	120	45	80	1,76	53
Л68	67-70	-	320	90	55	70	1,68	55
Л60	59-62	-	380	160	25	62	0,78	77
ЛАН59-3-2	57-60	2,5-3,5 Al 2-3 Ni	380	300	50	-	0,5	75
ЛЖМц59-1-І	57-60	0,1-0,4 Al 0,6-1,2 Fe 0,5-0,8 Mn 0,3-0,7 Sn	450	170	50	58	1,18	88
ЛО70-І	69-71	1-1,5 Sn	350	100	60	70	0,6	60
ЛК80-3	79-81	2,5-4 Si	310	200	58	55	0,4	100

На практиці використовують сплави з вмістом цинку не більше 42 %, які мають добрі механічні властивості (див. рис. 8.4).

В техніці можуть використовуватись однофазні або двофазні латуні. Однофазні латуні мають структуру α – твердого розчину, і оскільки в цій області відсутні фазові перетворення, то в α – латунях неможливо отримати нерівноважний стан, - як наслідок, її неможливо загартувати.

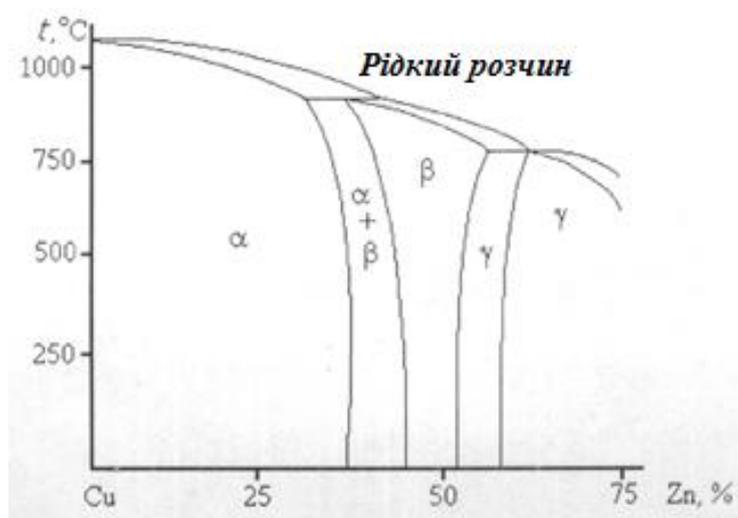


Рис. 8.3. Діаграма стану мідь – цинк

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 90

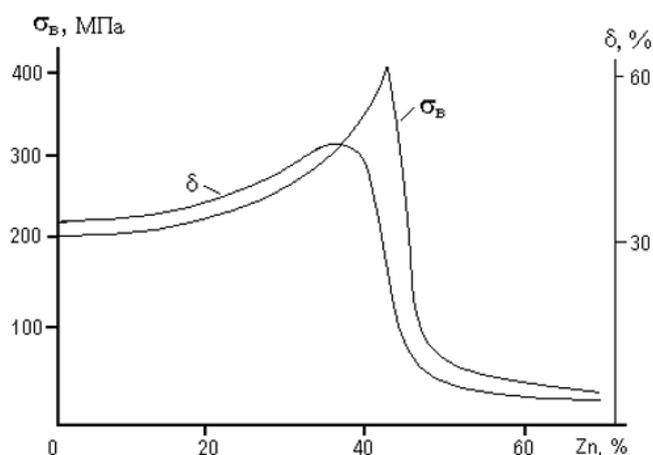


Рис. 8.4. Вплив цинку на механічні властивості міді

Однофазна латунь являє собою матеріал відносно невисокої твердості і міцності, що має значну пластичність. При переході за границю насичення (39 % Zn) появляється друга фаза β – електронне з'єднання CuZn, що супроводжується різким зниженням пластичності і підвищенням міцності і твердості. Це пояснюється тим, що β -фаза є твердою і крихкою, тому при збільшенні її кількості спостерігається підвищення твердості і крихкості сплаву. Використання знаходять або однофазні латуні, або двофазні, в яких відсутнє домінування крихкої фази (тобто ті, що містять 41–42 % Zn).

Однофазні латуні завдяки високій пластичності добре деформуються в холодному стані, при цьому збільшуються як міцність так і твердість латуні. Двофазні латуні піддають прокатці і пресуванню в гарячому стані. Латунь дуже добре піддається обробці різанням, особливо якщо вона легована свинцем. При різанні свинцевистих латуней утворюється коротка ломка стружка, що полегшує обробку виробів. Для підвищення міцності і твердості латунь легують алюмінієм ($\approx 4\%$). Латунь використовують як конструкційний матеріал там, де потрібна висока міцність і корозійна стійкість: в трубопровідній арматурі, в хімічному машинобудуванні і особливо в суднобудуванні. Виготовляють з латуней листи, стрічки, дріт, а потім з цього прокату – радіаторні трубки, снарядні гільзи, трубопроводи, шайби, гайки, втулки, ущільнюючі кільця, струмопровідні деталі електрообладнання.

Бронзи – це сплави міді з усіма іншими елементами, крім цинку. В їх назві використовують прикметники, що вказують на другий компонент. В залежності від складу і структурного стану після обробки міцність бронзи може бути підвищена з 200 до 750 МПа. Бронзи поділяються на алюмінієві, олов'яні, кремнієві, берилієві і т. п. Бронзи маркують буквами «Бр» (бронза), за якими слідують букви і цифри, що вказують на назву і вміст в % легуючих елементів. Наприклад, БрОФ10-1: 10 % Sn, 1 % P, остальне мідь.

Олов'яні бронзи відомі з глибокої давнини; іменно цей чудовий матеріал дав назву бронзовому віку. Вони, як і інші сплави, поділяються на деформовані ($< 10\%$ Sn) і ливарні ($> 10\%$ Sn). Колись бронзи отримували

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 91

назву в залежності від їх призначення: монетна (4–10 % Sn), гарматна (8–18 % Sn), дзвонна (20–30 % Sn), дзеркальна (30–35 % Sn). Олов'яні бронзи відрізняються хорошими ливарними властивостями, наприклад, малою усадкою при кристалізації, тому можна відливати складні по конфігурації виробу. З метою економії дорогого олова в бронзи додають цинк в такій кількості, щоб він повністю розчинявся в міді, утворюючи твердий розчин, тим самим підвищуючи механічні властивості. Для підвищення антифрикційних властивостей і кращої оброблюваності різанням в олов'яні бронзи додають свинець. Ливарні олов'яні бронзи використовуються для пароводяної арматури, оскільки вони мають високу корозійну стійкість у воді і на повітрі.

Деформовані бронзи мають однофазну структуру твердого розчину. Після холодної обробки тиском бронзи піддають відпалу при 600–700 °С. Вони більш пластичні і міцніші за ливарні. Крім того, деформовані олов'яні бронзи мають високі пружні властивості, тому їх використовують для отримання пружин і мембран в електротехніці та інших областях.

Алюмінієві бронзи зазвичай містять від 5 до 10 % алюмінію. Механічні і корозійні властивості цієї бронзи вищі, ніж олов'янистих. По мірі зміни складу, аналогічно латуням і олов'янистим бронзам, змінюються і властивості: твердість НВ, міцність σ_b і пластичність δ швидко ростуть, потім пластичність і міцність понижуються із-за утворення другої крихкої фази. Тому на практиці використовують двофазні бронзи, що містять не більше 11 % Al. Двофазні бронзи відрізняються високою міцністю – до 600 МПа і твердістю більше 100 НВ. Оскільки алюмінієві бронзи відчувають евтектоїдні перетворення, то їх можна піддавати гартуванню і старінню. Однофазні алюмінієві бронзи (БрА7) більш пластичні, ніж двофазні, і відносяться до деформованих. Вони мають високу міцність і пластичність ($\sigma_b = 400\text{--}450$ МПа, $\delta = 60\%$).

Легують алюмінієві бронзи звільзом, нікелем, марганцем для усунення ливарних недоліків і підвищення механічних властивостей після зміцнення термічною обробкою (гартування і послідуєчого старіння). Наприклад, у бронзи БрАЖН 10-4-4 твердість зростає від 140–160 НВ до 400 НВ. Тому із алюмінієво-залізонікелевої бронзи виготовляють деталі, що працюють в умовах зношення: сидла клапанів, напрямні втулки, частини насосів і турбін, шестерні та ін.

Кремністі бронзи містять до 3 % Si і є заміниками олов'янистих бронз. Вони пластичні, корозійно-стійкі в деяких агресивних середовищах, добре зварюються і паяються. Для підвищення твердості і міцності кремністих бронз їх легують марганцем і нікелем з послідуєчою термічною обробкою. Ці бронзи використовують замість більш дорогих олов'янистих при виготовленні антифрикційних деталей, а також для заміни берилієвих бронз при виробництві пружин.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 92

Свинцевисті бронзи (БрС30) мають високі антифрикційні властивості, високу теплопровідність (до 300 °С). Міцність таких бронз невелика, але вони дуже пластичні, добре чинять опір ударним навантаженням. Тому із цих бронз виготовляють вкладиші підшипників, що працюють при великих тисках і швидкостях.

Берилієві бронзи (БрБ2) містять не більше 2–2,5 % берилію. Оскільки берилій утворює з міддю твердий розчин змінної розчинності, то цю бронзу використовують тільки після її зміцнення термічною обробкою (гартуванням від 780 °С і старінням при 320 °С). При цьому підвищуються як міцність, так і пружні властивості: $\sigma_b = 1300\text{--}1500$ МПа, $\sigma_{пр} = 600\text{--}740$ МПа. Крім того, берилієві бронзи володіють високою електропровідністю, тому їх використовують у вигляді пружин в електроапаратурі, в якості пружних контактів и т. п. Але висока вартість не дозволяє широко використовувати цю бронзу. Замінюють її більш дешевою – титановою або титановохромовою бронзою. Після термічної обробки вона має майже такі ж властивості міцності, але вона більш пластична і має високу релаксаційну стійкість при температурі до 400 °С. Тому пружні елементи з такої бронзи можуть працювати при більш високій температурі, ніж із берилієвої. Склад і механічні характеристики деяких ливарних і деформованих бронз приведені в табл. 8.4.

Таблиця 8.4 – Хімічний склад і механічні властивості бронз

Бронза	Вміст елементів, %				σ_b МПа	σ_{02}	δ , %	НВ
	Sn	Pb	Zn	Інші				
Деформуємі бронзи								
БрОЦС4-4-2,5	3-5	1,5-3,5	3-5	-	350	130	40	60
БрОФ6,5-0,4	6-7	-	-	0,26-0,4 Р 0,1-0,2 Ni	400	250	60-70	80
БрАЖНІ 0-4-4 (гартування і старіння)	-	-	-	9,5-11 Al 3,5-5,5 Fe 3,5-5,5 Ni	750-830	-	9-15	180-220
БрБНТ1,9 (гартування і старіння)	-	-	-	1,85-2,1 Be 0,2-0,4 Ni 0,1-0,25 Ti	1200	-	4	370
Ливарні бронзи								
Бр05Ц5С5	4-6	4-6	4-6	-	180	100	4	60
БрС30	-	27-31	-	-	60	-	4	25

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 93

Антифрикційні сплави

Антифрикційні матеріали призначені для виготовлення підшипників (опор) ковзання, які широко використовуються в сучасних машинах і приладах із-за їх стійкості до вібрацій, безшумності роботи, малих габаритів. Антифрикційність – це здатність матеріалу забезпечувати низький коефіцієнт тертя ковзання і тим самим низькі втрати на тертя і малу швидкість зношування деталі, що спрягається – сталюого чи чавунного валу.

Хороший антифрикційний матеріал повинен мати високу теплопровідність, добре змочуватись мастилом, утворювати на поверхні захисні плівки м'якого металу, добре перепрацьовуватись, мати високий опір втомі.

Підшипниковий матеріал оцінюють по коефіцієнту тертя і по допустимим значенням тиску на опорі p і швидкості ковзання v . Параметр pv визначає питому потужність тертя.

Металеві підшипникові матеріали призначені для роботи в режимі рідинного тертя, що поєднується в умовах експлуатації з режимом граничного мащення. Із-за перегріву можливе руйнування граничної масляної плівки, в цьому випадку важливим є те, як матеріал чинить опір зварюванню. Тому в структурі сплаву повинна бути м'яка складова.

За структурою підшипникові матеріали поділяються на два типи: 1) сплави з м'якою матрицею і твердими включеннями; 2) сплави з твердою матрицею і м'якими включеннями.

Сплави першого типу – це бабіти, а також мідні сплави, в основному, бронзи. М'яка матриця в цих сплавах забезпечує добру припрацьовуваність і особливий мікрорельєф поверхні, що покращує розподіл мастила і тепловідвід. Тверді включення, на які опирається вал, забезпечують високу зносостійкість.

Бабіти – м'які (30 НВ) антифрикційні сплави на олов'яній чи свинцевій основі. В відповідності з ГОСТ 1320–74 до сплавів на олов'яній основі відносяться бабіти Б83 (83 % Sn, 11 % Sb, 6 % Cu) і Б88, на свинцевій основі – Б16 (16 % Sn, 16 % Sb, 2 % Cu), БС6 и БН. Особливу групу утворюють більш дешеві свинцево-кальцієві бабіти: БКА и БК2 (ГОСТ 1209-90).

За антифрикційними властивостями бабіти переважають всі інші сплави, але значно поступаються їм за опором втомі. В зв'язку з цим бабіти використовують тільки для тонкого (менше 1 мм) покриття робочої поверхні опори ковзання. Найкращими властивостями володіють олов'яні бабіти, в яких $pv = (500–700) \cdot 10^5$ Па·м/с. Із-за високого вмісту дорогого олова їх використовують для підшипників відповідального призначення (дизелів, парових турбін і т. п.), що працюють при великих швидкостях і навантаженнях (табл. 8.5). Їх структура (див. рис. 8.5) складається з твердого розчину сурми в олові (мя'ка фаза, темний фон) і твердих включень β (SnSb) і Cu_3Sn .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 94

Таблиця 8.5 – Характеристики антифрикційних матеріалів

Матеріал	HB	Коефіцієнт тертя по сталі		Допустимий режим роботи		
		Без мастильного матеріалу	З мастильним матеріалом	p МПа	v , м/с	pv МПа·м/с
Бабіти:						
Б83	30	0,07-0,12	0,004-0,006	15	50	75
Б16	30			10	30	3
БК2	32			15	15	6
Бронзи:						
БрО10Ф1	100	0,1-0,2	0,004-0,009	15	10	15
Бр05Ц5С5	60			8	3	12
БрС3О	25			25	12	30
Латуні:						
ЛЦ16К4	100	0,15-0,24	0,009-0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	80			10,6	1	10
Алюмінієвий сплав						
А09-2	31	0,1-0,15	0,008	25	20	100

Бронзи відносяться до кращих антифрикційних матеріалів. Особливе місце серед них займають олов'янисті і олов'янисто-цинковосвинцевисті бронзи. До перших відносяться бронзи БрО10Ф1, БрО10Ц2, до других — Бр05Ц5С5, Бр06Ц6С3 (ГОСТ 613–79). Бронзи використовують для багатолітніх підшипників ковзання турбін, електродвигунів, компресорів, що працюють при значних тисках і середніх швидкостях ковзання (табл. 8.2).

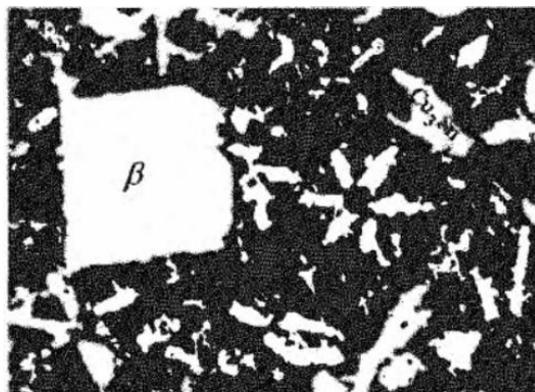


Рис. 8.5. Мікроструктура бабіту Б83 ×400

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 95

В останній час бронзи широко використовуються як компоненти порошкових антифрикційних матеріалів або тонкостінних пористих покриттів, змочених твердими мастильними матеріалами.

Латуні використовують в якості заміників бронзи для опор тертя. Але за антифрикційними властивостями вони поступаються бронзі. Двофазні латуні ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и т.д. (ГОСТ 17711– 93) використовують при малих швидкостях ковзання (< 2 м/с) і невисоких навантаженнях. Їх часто використовують для опор тертя приладів.

До сплавів другого типу відносяться свинцевиста бронза БрС30 с 30 % Рь (ГОСТ 493–79), і алювієві сплави з оловом, наприклад, сплав А09–2 (9 % Sn, 2 % Cu). Функцію м'якої складової в цих сплавах виконують включення свинцю або олова. При граничному терті на поверхню валу переноситься тонка плівка цих м'яких легкоплавких металів, захищаючи шийку сталюого валу від пошкодження.

Антифрикційні властивості сплавів достатньо високі, особливо в алюмінієвих сплавах. Із-за хорошої теплопровідності граничний шар мастильного матеріалу на цих сплавах зберігається при великих швидкостях ковзання і високому тиску (см. табл. 8.2).

Алюмінієвий сплав А09–2 використовують для відливання монометалевих вкладишів, бронзу – для наплавлення на сталюну стрічку.

На даний час найбільше поширення отримали багатошарові підшипники, в склад яких входять багато із розглянутих вище сплавів. Сплави або чисті метали в них укладені шарами, кожен із яких має визначене призначення.

Будову підшипника із чотирьох шарів, що використовується в сучасному автомобільному двигуні, показано на рис. 8.6.

Він складається з сталюї основи, шару (250 мкм) свинцевистої бронзи (БрС30), тонкого (≈ 10 мкм) шару нікелю чи латуні і шару свинцево-олов'янистого сплаву товщиною 25 мкм. Сталюна основа забезпечує міцність і жорсткість підшипника; верхній м'який шар покращує пропрацьованість деталей підшипника. Коли він зноситься, робочим шаром стає свинцевиста бронза. Шар бронзи, що має невисоку твердість, також забезпечує добре прилягання шийки валу, високу теплопровідність і опір втомі. Шар нікелю служить бар'єром, що не допускає дифузію олова із верхнього шару в свинець бронзи.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08-05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 96

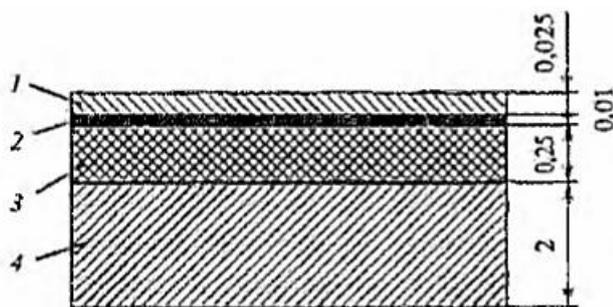


Рис. 8.6. Будова металевго підшипника ковзання: 1 – сплав свинцю і олова; 2 – нікель; 3 – свинцевиста бронза; 4 – сталь

Таблиця 8.6 – Марки і використання кольорових металів і сплавів

Вид матеріалу	Умовне позначення	Область використання
Бронзи ливарні олов'яністі: БрОЗЦІ2С5, Бр05Ц5С5, БрО10ФІ	БрОЗЦІ2С5 ГОСТ 613-79	Вінці черв'ячних коліс, втулки підшипників, корпуси насосів
Бронзи ливарні безолов'яністі: БрА9ЖЗЛ, БрА10Мц2Л, БрА10ЖЗМц2	БрА9ЖЗЛ ГОСТ 493-79 БрА10Мц2Л ГОСТ 493-79	Фасонне лиття, труби, корпуси Вінці невеликих черв'ячних коліс
Бронзи безолов'яністі, що оброблюються тиском: БрАЖ9-4, БрБ2, БрКМц3-1, БрМц5	БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-78	Деталі з антифрикційними властивостями: гайки ходових гвинтів, втулки, шайби
Латуні ливарні: ЛЦ40С, ЛЦ30А3; ЛЦ40Мц1,5	ЛЦ40Мц1,5 ГОСТ 17711-93	Корпуси кранів, трійники, втулки
Латуні, що оброблюються тиском: Л68, Л63, ЛМц58-2	Л68 ГОСТ 15527-70	Шпинделі, втулки кранів, гайки, корозійностійкі деталі
Мідь: МО, МІ, М2	М4 ГОСТ 859-78	Деталі, що мають високу теплопровідність: гайки, болти, контакти
Сплави алюмінієві ливарні: АК7, АМ5	АК7 ГОСТ 1583-93 АМ5 ГОСТ 1583-93	Корпуси приладів, деталі карбюраторів, арматура двигунів Високонавантажені деталі, що сприймають вібраційні навантаження

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08-05.01/131.00.1/Б /OK11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 97

Сплави алюмінієві, що оброблюються тиском: АК4, АМгб	АК4 ГОСТ 4784-74 АМгб ГОСТ 4784-74	Лопатки компресорів, крильчатки, деталі двигунів Трубопроводи, ємкості для рідин
Сплави титанові: ВТ5, ВТ6, ВТ9	ВТ6 ГОСТ 19807-74	Деталі, що мають антикорозійну стійкість Деталі, що працюють в широкому температурному діапазоні Деталі, що використовуються в авіабудуванні і космічній техніці.
Сплави магнієві ливарні: МЛ5, МЛ9, МЛ15	МЛ5 ГОСТ 2856-79	Несилові деталі: корпуси, кришки
Сплави магнієві деформуємі: МА1, МА2, МА5	МА1 ГОСТ 14957-76	Деталі, що піддаються високим відцентровим навантаженням при помірних температурах

8.2. Завдання

1. Якій термічній обробці піддають сплав дюралюміній? Для обґрунтування відповіді наведіть діаграму стану алюміній – мідь. Який механізм зміцнення дюралюмінію?
2. Який матеріал використовують для годинникових і приладових пружин? Опишіть його склад і структуру, приведіть механічні характеристики.
3. Призначте марку латуні, стійкої до корозії в морській воді. Розшифруйте її склад і опишіть структуру, використовуючи діаграму стану мідь – цинк. Вкажіть спосіб зміцнення і основні властивості латуні.
4. З чого виготовляють вкладиші підшипників ковзання? Опишіть склад і структуру сплавів, назвіть марки.
5. Для виготовлення відповідальних деталей (втулки, клапани, зубчаті колеса) вбрано сплав БрАЖН10-4-4. Розшифруйте склад, вкажіть режим термічної обробки, механічні властивості і опишіть структуру, використовуючи діаграму стану мідь – алюміній.
6. Для виготовлення мембран і інших пружних елементів використовують бронзу БрБНТ1,9. Укажіть склад, режими термічної обробки і механічні властивості матеріалу. Які процеси протікають при термічній обробці? Поясніть природу зміцнення в зв'язку з діаграмою стану мідь – берилій.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 98

7. Приведіть марки і опишіть структуру ливарних алюмінієвих сплавів. Яким образом підвищують їх експлуатаційні властивості? Укажіть області використання виливок із алюмінієвих сплавів.

8. Для виготовлення деталей в авіабудуванні використовується сплав Д18. Розшифруйте склад сплаву, вкажіть спосіб виготовлення деталей із нього і приведіть характеристики механічних властивостей.

9. Для виготовлення деталей в авіабудуванні використовується сплав АК6. Розшифруйте склад сплаву, вкажіть спосіб виготовлення деталей із нього і приведіть характеристики механічних властивостей. Якій термообробці піддають цей сплав для зміцнення?

10. Для деталей ущільнення використовують бронзу БрОФ6,5-0,4. Розшифруйте склад сплаву, опишіть структуру і термічну обробку бронзи, приведіть характеристики механічні властивості.

11. Для деталей пароводяної арматури вибрана бронза БрО5Ц5С5. Розшифруйте склад сплаву, опишіть структуру і поясніть призначення легуючих елементів. Приведіть характеристики механічних властивостей.

12. Для виготовлення деталей способом глибокої витяжки використовують латунь Л68. Укажіть склад і опишіть структуру сплаву. Призначте режим термічної обробки, що використовують між окремими операціями витяжки, і обґрунтуйте його вибір. Приведіть характеристики механічних властивостей цього сплаву.

13. Зразок із сплаву Д16 повільно охолодили від 550 °С до кімнатної температури. Твердість складала 65 НВ. Другий зразок загартували з тієї ж температури в воді, а потім піддали нагріву на 150 °С в протягом 100 годин. Твердість сплаву стала рівною 120 НВ. Поясніть різницю значень твердості.

14. Зразки загартованого сплаву Д16 нагрівали на 150 °С протягом різного часу. Вимірювання твердості дали наступні результати:

Час відпалу, годин – 0; 10; 100; 200; 1000. Твердість, НВ – 65; 95; 120; 115; 100.

Побудуйте графічну залежність твердості від часу відпалу. Поясніть таку поведінку сплаву.

15. Який сплав належить вибрати для виготовлення підшипників ковзання турбіни? Поясніть структуру сплаву і її вплив на антифрикційні властивості.

16. Запропонуйте сплав з високою питомою міцністю для виготовлення високонавантажених деталей літаків (обшивка, шпангоути, лонжерони). Опишіть його структуру і спосіб зміцнення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 99

8.4. Рекомендована література

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Політехніка», 2001. – с. 217-224.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків:Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 147-156.
3. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – с. 203-222.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 144-156.
5. Материаловедение /Под ред. В.Н. Арзамасова. – М.:Машиностроение, 1986. – с. 165-175.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.08- 05.01/131.00.1/Б /ОК11-2022
	Екземпляр № 1	Арк 100 / 100

Додаток А

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні роботи з курсу «Технологічні процеси машинобудівних виробництв та основи матеріалознавства» виконують у навчально-наукових лабораторіях Державного університету «Житомирська політехніка». Дотримання правил техніки безпеки є обов'язковою умовою при виконанні робіт. Для забезпечення цього кожен студент повинен ознайомитися з вимогами правил техніки безпеки та отримати допуск викладача до виконання робіт.

Забороняється перебування в лабораторіях у верхньому одязі. Студенти, які тимчасово не задіяні до роботи з обладнанням, повинні перебувати у місці, яке вкаже викладач.

Устаткування, яке використовується для виконання лабораторних робіт, обладнане електроприводами з напругою живлення 380 вольт. З метою попередження ураження електричним струмом загальними вимогами при використанні лабораторного обладнання є дотримання правил експлуатації промислового електроустаткування. Студентам забороняється вмикати обладнання, не призначене для виконання поточної лабораторної роботи, відчиняти дверцята електричних шаф і рубильників. Без вказівки викладача або лаборанта забороняється вмикати або вимикати вимикачі та рубильники.

Всі зайві предмети необхідно прибрати з робочого місця. Перед запуском обладнання необхідно пересвідчитись у його безпечності. При виявленні недоліків не вмикати напругу і повідомити про це викладача або лаборанта, не вживаючи самому заходів для усунення неполадок.

Виконуючи роботи, які передбачають нагрівання матеріалів, необхідно оберегатися термічних опіків шкіри та загоряння одягу.

Не допускайте пустощів в лабораторіях! Не користуйтеся обладнанням, яке не стосується виконуваної лабораторної роботи. Не переносьте лабораторне обладнання з одного робочого місця на інше. Студенти, які порушують правила техніки безпеки, не допускаються до виконання лабораторних робіт. Вони повинні перездати ці правила.

Порушення правил техніки безпеки може призвести до нещасних випадків. Строго дотримуйтесь цих правил. Це збереже вам здоров'я та життя. Застерігайте від порушення правил техніки безпеки своїх колег.