

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт

з навчальної дисципліни «Системи технологій»

для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»

2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Системи технологій» для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» спеціальності 131 «Прикладна механіка» / Укл.: В.Г. Міщенко, Е.А. Бажміна – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 50 с.

Укладачі: В.Г. Міщенко, професор, д-р техн. наук
Е.А. Бажміна, доцентка, докторка філософії

Рецензент: М.Ю. Осіпов, доцент, канд. техн. наук

Гаранти ОПП: О.Є. Капустян, зав. кафедри «ІТЗ та МК», доцент
канд. техн. наук
М.Ю. Осіпов, доцент кафедри «ІТЗ та МК»,
канд. техн. наук

Відповідальний
за випуск: Е.А. Бажміна, доцентка, докторка філософії

Затверджено
на засіданні кафедри
«Інтегровані технології зварювання
та моделювання конструкцій»
Протокол № 7
від «3» квітня 2024 р.

Рекомендовано до видання
НМК ІФ факультету
Протокол № 9
від «14» травня 2024 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Лабораторна робота № 1. ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ	6
2 Лабораторна робота № 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ	12
3 Лабораторна робота № 3. ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ МЕТАЛІВ.....	24
4 Лабораторна робота № 4. ДІАГРАМИ СТАНУ ТА ТЕРМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ СПЛАВІВ	30
5 Лабораторна робота № 5. МІКРОСТРУКТУРА ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ	41
Додаток А Таблиця визначення твердості за Брінеллем	48
Додаток Б Таблиця відповідності значень твердості	50

ВСТУП

Динамічний розвиток конструкцій машин відбувається при постійному прагненні до збільшення їхньої продуктивності, що майже завжди супроводжується підвищенням механічної та теплової напруженості рухомих сполучень деталей. До того ж ставляться задачі досягнення високої надійності та довговічності машин, зниження їхньої маси, зменшення витрат дефіцитних матеріалів.

У зв'язку з динамічним розвитком матеріалознавства зростають вимоги до продукції передових підприємств України. І вихід тут один – пошук нових виняткових можливостей, розвиток корпоративної науки, впровадження новітніх технологій, у тому числі нанотехнологій, створення нової конкурентоспроможної продукції з кращими споживчими властивостями й ціннісними характеристиками, підвищення якості сервісного обслуговування, продуктивності праці, значне скорочення витрат.

Курс «Системи технологій» є необхідною складовою частиною циклу освітньо-професійної підготовки фахівців, які працюючи в умовах ринкової системи, зможуть добре орієнтуватись у тенденціях розвитку сучасних технологій у паливно-енергетичному комплексі, машинобудуванні, металургії та електроніці.

Згідно з програмою навчальної дисципліни «Системи технологій» основною метою її викладання є формування та засвоєння студентами економічних основ технологічного розвитку, визначення та засвоєння чинників, що впливають на собівартість та якість продукції в порівнянні сучасних технологій України, Японії, США, Німеччини та інших розвинених країн світу, а також рівня розвитку технологій як пріоритетного напрямку забезпечення соціальних потреб населення та підвищення його життєвого рівня. Студент мусить знати принципи економічної доцільності вироблення певного продукту або досконалості й ефективності технологічного процесу та вміти їх визначити в грошовому еквіваленті.

Засвоїти методи виготовлення окремих промислових виробів та їхніх характеристик, а також орієнтуватись у розробці нових технологічних ліній або технологічних процесів виробництва.

З метою повнішого оволодіння дисципліною та набуття практичних навичок у більшості лабораторних робіт закладені

елементи простіших досліджень. Результати розрахунків та випробувань, які отримані підгрупою, узагальнюються у вигляді графіку або таблиці, а потім аналізуються всією групою та заносяться у звіти. Для економії часу контроль знань у студентів рекомендується проводити шляхом перевірки самостійних контрольних робіт, які в електронному вигляді надсилаються викладачеві.

У результаті вивчення курсу студент має знати: загальні поняття, визначення та взаємозв'язки, що мають місце на виробництві та при розподілі продукції в умовах ринкових відносин; основні показники якості промислової продукції та їхній взаємозв'язок із технологіями виробництва; техніко-економічні причини різної ефективності виробництва в умовах планової та ринкової економіки; ключові напрями науково-технічного прогресу, його роль у підвищенні виробництва.

Представлені лабораторні роботи містять мету роботи, необхідні матеріали й устаткування для її виконання, основні теоретичні положення, методичні рекомендації щодо виконання роботи, вимоги до оформлення звіту, контрольні запитання та рекомендовану літературу.

Методичні вказівки призначені для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» спеціальності 131 «Прикладна механіка».

1 Лабораторна робота № 1.

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ

МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ

1.1 Мета роботи

1. Набути практичних навичок з техніки випробування металевих сплавів на розтяг.
2. Визначити показники міцності та пластичності за діаграмою розтягу та результатами вимірювання зразків.
3. Навчитися за результатами випробування будувати та аналізувати залежність показників міцності та пластичності від вмісту в сталі вуглецю.

1.2 Матеріали й устаткування

Розривна випробувальна машина; пристрій для розмітки зразків; штангенциркуль; мікрометр. Розривні зразки зі сталей 10, 25, 45, У7, У10, У13 у нормальному стані.

1.3 Основні положення

Міцність – це властивість матеріалів опиратися деформуванню та руйнуванню під впливом зовнішніх навантажень. **Пластичність** – властивість матеріалів незворотно деформуватися без порушення суцільності під дією зовнішніх механічних навантажень або внутрішніх напружень.

При випробуваннях на розтяг визначають показники міцності: границі пропорційності, пружності, плинності (фізичну або умовну), тимчасовий опір, границю міцності та істинний опір розриву, а також показники пластичності: відносні видовження та звуження.

Для випробування на розтяг найчастіше застосовують циліндричні або плоскі зразки з розрахунковою довжиною 50 мм та діаметром (шириною) 10 мм. Застосовують зразки інших розмірів.

При розтягуванні зразка у випробувальній машині прилад, який записує, креслить діаграму розтягу та показує залежність деформації зразка від навантаження. На діаграмі розтягу пластичних металів є характерні точки, за якими визначають показники механічних властивостей (рис. 1.1, а).

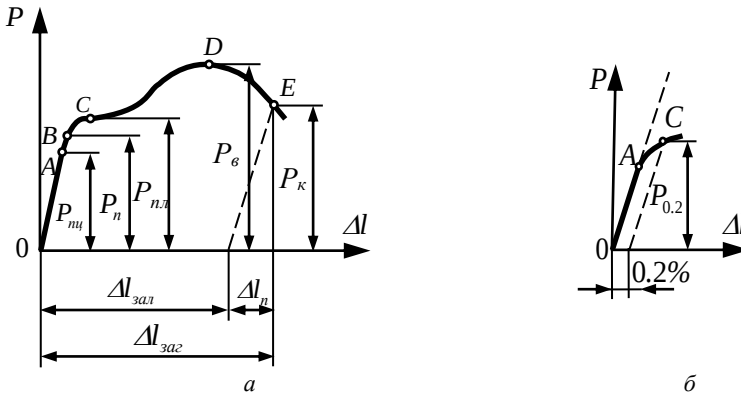


Рисунок 1.1 – Діаграми розтягу зразка з пластичного металу (а);
схема визначення умовної границі плинності для малопластичного металу (б)

Границя пропорційності відповідає прямолінійній залежності (пряма OA) між прикладеним навантаженням і пружною деформацією зразка. Границю пропорційності $\sigma_{нц}$, МПа визначають за формулою:

$$\sigma_{нц} = \frac{P_{нц}}{F_0}, \quad (1.1)$$

де $P_{нц}$ – навантаження, вище якого порушується пропорційність між прикладеним навантаженням та деформацією зразка, Н;

F_0 – площа поперечного перерізу зразка до деформації (розрахункова), м^2 .

При навантаженнях понад $P_{нц}$ порушується пропорційність між прикладеним навантаженням і деформацією зразка, проте зразок, як і раніше, деформується пружно, тобто при знятті навантаження він набуває попередніх розмірів. Точка В на діаграмі відповідає навантаженню P_n , яке викликає залишкове здовження зразка не більш ніж 0,05 % його розрахункової довжини l_0 . Границю пружності σ_n , МПа, визначають як відношення цього навантаження до площі поперечного перерізу зразка до деформації:

$$\sigma_n = \frac{P_n}{F_0}. \quad (1.2)$$

При подальшому збільшенні навантаження криволінійна частина діаграми може перейти в горизонтальну (ділянка C). Це свідчить про те, що метал деформується, «тече», без збільшення навантаження. За навантаженням P_{nl} (точка C на діаграмі) визначають фізичну границю плинності:

$$\sigma_{nl} = \frac{P_{nl}}{F_0}. \quad (1.3)$$

При випробуваннях порівняно крихких матеріалів площадка плинності на діаграмі відсутня (рис. 1.1, δ). У цьому випадку за навантаженням $P_{0.2}$, при якому залишкове видовження зразка $\Delta l_{зап}$ становить 0,2 % його початкової довжини, визначають умовну границю плинності:

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}. \quad (1.4)$$

Границя міцності – механічне напруження σ_{ϵ} , яке відповідає найбільшому навантаженню P_{ϵ} , що передуює руйнуванню зразка:

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{P_{\epsilon}}{F_0}. \quad (1.5)$$

Якщо зразок розтягувати й далі, на лінії DE діаграми навантаження знижується, а напруження збільшується (рис. 3.1, a). Це пов'язане з утворенням у пластичних металів місцевого звуження поперечного перерізу (шийки). Фактичне максимальне напруження перед руйнуванням зразка істинний опір розриву:

$$\sigma_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{F_{ui}}, \quad (1.6)$$

де P_{κ} – навантаження в момент руйнування зразка, Н;

F_{ui} – площа мінімального поперечного перерізу зразка після розриву (площа шийки).

За результатами вимірювання розірваних зразків до та після випробування визначають показники пластичності:

– відносне видовження

$$\delta = \frac{(l_k - l_0) \cdot 100\%}{l_0}, \quad (1.7)$$

де l_0 та l_k – відповідно початкова та кінцева довжини зразка.

– відносне звуження

$$\psi = \frac{(F_0 - F_u) \cdot 100\%}{F_0}, \quad (1.8)$$

де F_0 та F_u – площа поперечного перерізу зразка до та після розриву.

1.4 Методичні рекомендації щодо виконання лабораторної роботи

1. Вивчити будову та принцип роботи розривної машини. Ознайомитися з правилами техніки безпеки роботи на машині.

2. Розмітити, провести вимірювання зразків. Після випробування провести вимірювання розірваних зразків і з діаграми розтягу записати результати в протокол випробування (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Протокол випробування на розтяг

Розміри зразка, мм						Навантаження					Механічні властивості							
до випро- бування			після випро- бування								МПа					%		
l_0	d_0	F_0	l_k	d_u	F_u	P_{ny}	P_n	$P_{пл}$ ($P_{0.2}$)	P_e	P_{κ}	σ_{ny}	σ_n	σ_{nl} ($\sigma_{0.2}$)	σ_e	σ_{κ}	δ	ψ	

3. Розрахувати та визначити середнє значення трьох зразків для кожної марки сталі показників механічних властивостей.

4. Побудувати графічні залежності механічних властивостей від вмісту вуглецю в сталі, апроксимувати результати випробування за допомогою сучасних технічних засобів.

5. Зробити висновки про вплив вуглецю на показники міцності та пластичності.

1.5 Зміст звіту

1. Назва роботи та її мета.
2. Основні положення за темою роботи.
3. Діаграма розтягу, ескізи зразків до та після руйнування з нанесенням розмірів.
4. Розрахункові формули та розрахунки для визначення механічних властивостей.
5. Таблиця випробування, графік залежності механічних властивостей від вмісту вуглецю.
6. Висновки.

1.6 Контрольні запитання

1. Які показники механічних властивостей визначають під час випробування на розтяг?
2. Дайте визначення границь пропорційності, пружності, плинності, міцності, а також істинного опору розриву.
3. Як визначають фізичну та умовну границю плинності?
4. Яку властивість матеріалу характеризує відносне звуження?
5. Наведіть формули для визначення показників міцності та пластичності.
6. Як впливає вуглець на характеристики міцності та пластичності сталі?

Рекомендована література

1. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум : посібник для вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації / А.С. Опальчук, О.О. Котречко, Л.Л. Роговський, О.Є. Семеновський, І.Л. Роговський. К. : НУБіП України, 2015. 428 с.
2. Міщенко В. Г., Лоскутов С. В. Технології виробництва спеціальних сталей та їхні фізико-механічні властивості : монографія. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2023. 168 с.

3. Попович В. В., Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник. Львів : Світ, 2006. 624 с.
4. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів : підручник. К. : Знання, 2016. 400 с.

2 Лабораторна робота № 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

2.1 Мета роботи

1. Опанувати вимірювання твердості металевих зразків різними методами.
2. Засвоїти застосування того або іншого методу визначення твердості; облаштування приладами для вимірювання твердості.
3. Визначити залежність твердості металів від хімічного складу та термічного оброблення сплаву.

2.2 Матеріали й устаткування

Прилади для вимірювання твердості за методом Брінелля, Роквелла, Вікерса, мікротвердомір. Зразки різних залізовуглецевих сплавів (сталей і чавунів); зразки з міді, алюмінію і сплавів на їхній основі; зразки із загартованої та відпущеної сталі. Наждакові круги й абразивний папір.

2.3 Послідовність виконання роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал за темою заняття.
2. Ознайомитися з приладами й методами визначення твердості за Брінеллем, Роквеллом, Вікерсом та мікротвердості.
3. Виміряти твердість запропонованих зразків металів і сплавів на приладах Брінелля і Роквелла. Значення записати в табл. 2.1 і 2.2 відповідно.
4. Визначити значення границі міцності за даними вимірювання твердості за Брінеллем.
5. Результати вимірювання записати в таблиці.

2.4 Основні положення

При проектуванні та виробництві машин, механізмів, інструментів їхні деталі повинні мати певні механічні властивості. Механічні властивості металів характеризують опір матеріалу деформації та руйнуванню під дією зовнішніх навантажень. Практично всі методи визначення механічних властивостей є такими, що

руйнують об'єкт визначення. Для проведення випробування потрібні спеціальні машини, оскільки процеси випробування досить тривалі.

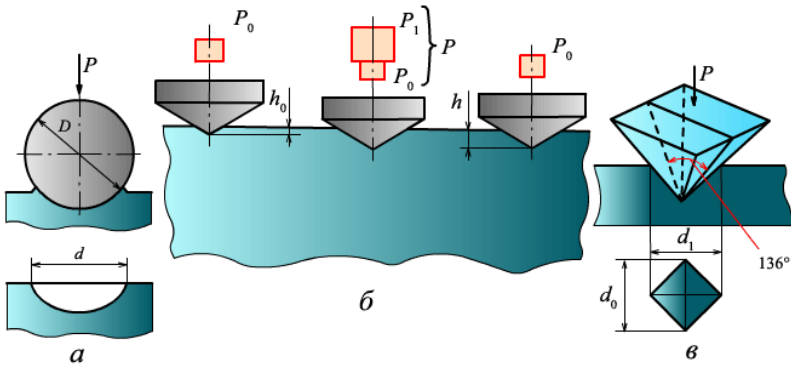
Механічні та фізичні властивості залежать від багатьох чинників: від хімічного складу матеріалу, виду оброблення (пластичної деформації, термічного оброблення). Тому в процесі виготовлення тих або інших деталей необхідно контролювати властивості, особливо механічні. Як зазначено раніше, звичайні методи випробування механічних властивостей не можуть бути використані на проміжних стадіях виготовлення деталей унаслідок тривалості й дорожнечі виготовлення зразків, тривалості самого процесу випробування. У цьому випадку використовують методи визначення твердості.

Твердість має суттєве практичне значення, оскільки відображує більшість властивостей матеріалу, наприклад, опір стиранню, різальні властивості, здатність до шліфування або різання, витримка місцевих пошкоджень. Крім того, за твердістю можна визначити й інші механічні властивості (наприклад, міцність на розрив). Між твердістю та іншими властивостями матеріалів є певний зв'язок, що підтверджується практикою.

Широке використання випробування матеріалів на твердість пояснюється тим, що для цього не потрібне виготовлення спеціальних зразків, методика випробування дуже проста і може здійснюватися безпосередньо на готовій деталі без значних руйнувань поверхні.

Методи визначення твердості здебільшого використовують принцип вдавлювання в поверхневий шар випробовуваного матеріалу твердих тіл (загартованої кульки, алмазного конуса або алмазної піраміди) і подальшого вимірювання розмірів поверхні відбитка за Роквеллом та проєкції відбитка за Вікерсом. Тому часто твердість визначають, як здатність матеріалу чинити опір вдавлюванню в нього індентора. Проте таке визначення не є загальним, оскільки є і інші методи визначення твердості, основані не на вдавлюванні, а на дряпанні (склерометрія), гойданні маятника, динамічному методі та інших.

Найчастіше практикують випробування твердості за методами Брінелля, Роквелла, Вікерса й метод визначення мікротвердості (рис. 2.1 і 2.2). У перерахованих методах при вдавлюванні індентора відбувається пластична деформація випробовуваного матеріалу під індентором. Чим більше опір матеріалу пластичній деформації, тим на меншу глибину проникає індентор і тим вище твердість.



а – твердість за Брінеллем; б – твердість за Роквеллом; в – твердість за Вікерсом
Рисунок 2.1 – Схема визначення твердості

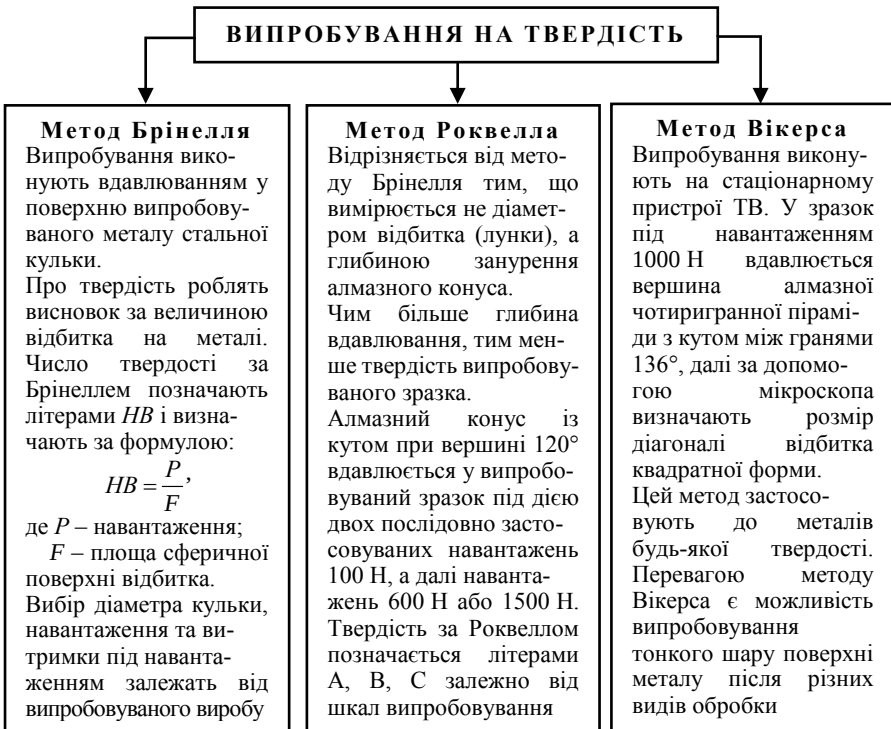


Рисунок 2.2 – Характеристика випробування на твердість

За Брінеллем визначають твердість щодо м'яких матеріалів: кольорових металів і їхні сплавів, сталі після відпалу, чавунів (окрім білого).

За Роквеллом найчастіше визначають твердість дуже твердих матеріалів: загартованих сталей, твердих сплавів, кераміки, твердих покриттів, у тому числі наплавлених шарів достатньої глибини на сталях і чавунах. Але методом Роквелла можна визначати твердість і порівняно м'яких матеріалів.

Метод Вікерса використовують для випробування твердості деталей малої товщини або тонких поверхневих шарів, що мають високу твердість. Цей метод також застосовують для вимірювання твердості твердих і м'яких матеріалів.

Методом мікротвердості зазвичай вимірюють твердість у межах окремих зерен або дуже тонких шарів. Два останні методи найчастіше використовують у дослідницьких роботах.

Твердість за методом Брінелля. Визначення твердості за Брінеллем полягає у вдавлюванні сталевोї кульки (індентора) з твердого сплаву діаметром D у випробовуваний матеріал зусиллям P (рис. 2.3). На поверхні утворюється сферичний відбиток (лунка).

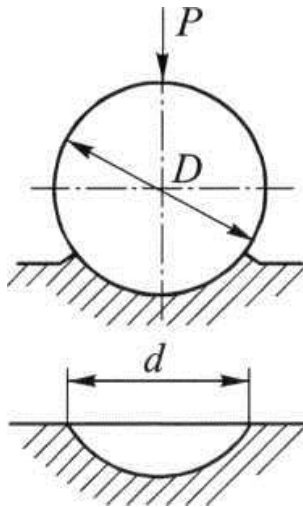


Рисунок 2.3 – Переріз площі відбитка індентора

Твердість за Брінеллем (HB) визначають відношенням навантаження P до площі поверхні відбитка F :

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (2.1)$$

Якщо вирахувати поверхню відбитка, що має форму кульового сегменту, то HB визначають за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (2.2)$$

де P – прикладене навантаження, Н;

D – діаметр кульки, м;

d – діаметр відбитка, м.

Розмір кульки вибирають залежно від товщини випробовуваного зразка: зазвичай користуються кульками стандартних розмірів діаметрами в 10 мм, 5 мм, 2,5 мм, 2,0 мм або 1,0 мм. Навантаження на кульку вибирають залежно від роду матеріалу й має бути пропорційним квадрату діаметра кульки в мм. Умовні стандартні норми, прийняті для різних матеріалів такі:

для сталі та чавуну $P = 30 D^2$

для міді та мідних сплавів $P = 10 D^2$

для бабітів і свинцевих бронз $P = 2,5 D^2$.

Більш детальні відомості вибору навантаження та витримки прикладеного навантаження для різних матеріалів знаходять у стандартній таблиці в лабораторії випробування твердості. Навантаження вважається вибраним правильно, якщо витримується співвідношення:

$$0,2 D < d < 0,6 D \quad (2.3)$$

Діаметр відбитка вимірюють за допомогою мікроскопу або лупи Брінелля у двох взаємно перпендикулярних напрямках і визначають як середнє арифметичне з двох вимірювань. Лупа має шкалу, ціна поділки якої дорівнює 0,05 мм. На рис. 2.4 показано вимірювання діаметра відбитка за допомогою лупи.

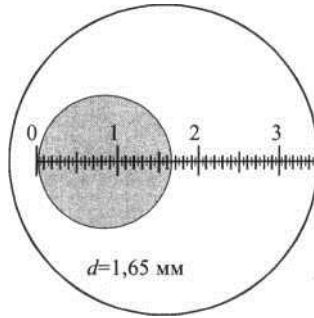


Рисунок 2.4 – Вимірювання діаметра відбитка

За результатами вимірювання діаметра відбитка на цьому матеріалі твердість за Брінеллем визначають за формулою (2.2). Щоб не вдаватися до тривалих і трудомістких розрахунків, на практиці для визначення твердості використовують стандартні таблиці (Додаток А).

Як зазначалося раніше, між механічними властивостями (зокрема, границею міцності σ_b і твердістю за Брінеллем) є певна залежність, яка може бути представлена емпіричною формулою:

$$\sigma_b = C \cdot HB \cdot 10 \text{ [МПа]}, \quad (2.4)$$

де C – коефіцієнт пропорційності

для сталей $C = 0,33 \dots 0,36$

для алюмінію $C = 0,4$

для міді $C = 0,48$

для дуралюміна $C = 0,37$

для латуні, бронзи $C = 0,53$

Треба зазначити, що для крихких матеріалів (чавун, силумін) надійної кореляції між твердістю і границею міцності отримати не вдається. Зокрема, для визначення границі міцності сірого чавуну використовують емпіричну формулу:

$$\sigma_b = \frac{10 \cdot (HB - 40)}{6} \text{ [МПа]}. \quad (2.5)$$

Твердість за методом Роквелла. Сутність визначення твердості за Роквеллом полягає у вдавлюванні в досліджуваний матеріал алмазного конуса з кутом при вершині 120° (шкали А і С) або сталеві кульки діаметром 1,5875 мм (шкала В) і подальшим вимірюванням глибини втискування h (рис. 2.5 і 2.6).

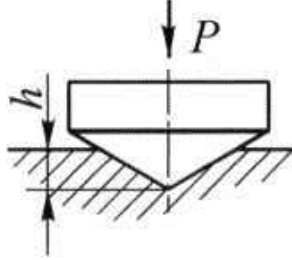


Рисунок 2.5 – Переріз глибини вдавлювання алмазного конуса

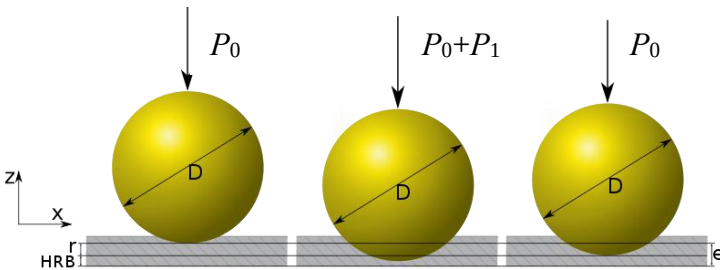


Рисунок 2.6 – Зображення глибини вдавлювання сталеві кульки

Твердість за Роквеллом визначають абстрактною величиною, залежною від глибини вдавлювання h , і може бути встановлена за формулою, але в цьому немає потреби, оскільки твердість визначають за показниками приладу.

Метод Роквелла дає змогу проводити випробування деталей після поверхневого зміцнення та об'ємного загартування і практично не псує поверхні виробу. Шкала С служить для випробування твердих матеріалів, що мають твердість за Брінеллем від 2300 МПа до 7000 МПа. Алмазний конус вдавлюють під навантаженням 1500 Н. Інтервал визначення твердості за шкалою С – від 22 до 68 одиниць, твердість позначається HRC.

Шкалу А використовують при випробуванні дуже твердих матеріалів або тонких поверхневих шарів (0,5... 1,0 мм). Застосовують той же алмазний конус, але вдавлюють під навантаженням у 600 Н. Значення твердості визначають за шкалою С, але позначають HRA. Інтервал вимірювання твердості за цією шкалою від 70 до 85 одиниць.

Шкала В призначена для випробування м'яких матеріалів, що мають твердість за Брінеллем від 600 до 2300 МПа. Сталеву кульку діаметром 1,5875 мм вдавлюють під навантаженням в 1000 Н. Твердість вимірюють у межах від 25 до 100 одиниць шкали В і позначається HRB.

Твердість за Вікерсом. Метод полягає у вдавлюванні алмазного наконечника, що має форму правильної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136° , у зразок під дією навантаження P та вимірювання діагоналі відбитка d , що залишився після зняття навантаження (рис. 2.7).

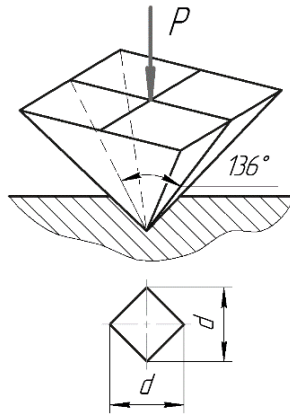


Рисунок 2.7 – Схема визначення твердості за Вікерсом

Навантаження P може змінюватися від 9,8 Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс). Твердість за Вікерсом вираховують за формулою, якщо P виражена в Н:

$$HV = 0.189 \frac{P}{d_{cp}^2} \text{ [МПа]}, \quad (2.6)$$

і якщо P виражена в кгс:

$$HV = 1.854 \frac{P}{d_{cp}^2} \text{ [кгс/мм}^2\text{]}. \quad (2.7)$$

Як правило, цей метод використовують для визначення твердості тонких поверхневих шарів і деталей малої товщини, що мають високу твердість. Поверхня зразків для визначення твердості пірамідкою мусить бути ретельно відшліфована шкуркою з дрібним зерном або відполірована. При вимірюванні твердості треба забезпечити перпендикулярність діючого зусилля до випробовуваної поверхні. Товщина зразка має бути не менше ніж 1,5 діагоналі відбитка. Чим тонше матеріал, тим меншим має бути навантаження. Число твердості за Вікерсом HV визначають за спеціальними таблицями за виміряною величиною d (діагоналі відбитка в міліметрах).

Мікротвердість. Визначення мікротвердості (твердості в мікроскопічно малих об'ємах) потрібне для тонких покриттів, окремих структурних складових сплавів (рис. 2.8).

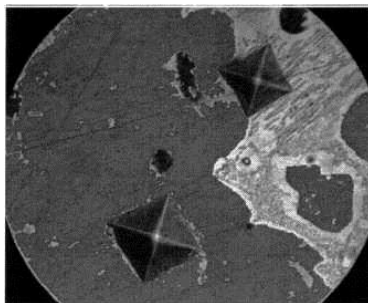


Рисунок 2.8 – Проекції відбитків індентора різних фаз

Прилад для визначення мікротвердості складається з механізму для втискування алмазної піраміди (індентора) з невеликим навантаженням і металографічного мікроскопу. У випробовувану поверхню вдавлюють алмазну піраміду під навантаженням 0,05...5,00 Н. Твердість H визначають за формулою (4.6), що і твердість за Вікерсом, якщо P виражена в Н.

2.5 Методичні рекомендації щодо виконання лабораторної роботи

Перш ніж розпочати вимірювання твердості зразка, необхідно вибрати методику визначення твердості (Брінелль, Роквелл). Для цього необхідно знати, в якому стані знаходиться досліджуваний зразок або деталь (після відпалу чи в загартованому стані). Якщо немає даних, то для орієнтування можна спробувати визначити твердість звичайним напилком. Якщо напилком ковзає по поверхні або лише трохи дряпає металеву поверхню, то зразок має високу твердість, і тоді треба застосовувати метод визначення твердості за Роквеллом.

Якщо ж зразок добре ріжеться напилком (легко знімається частина металу), то він має порівняно низьку твердість, і тоді треба застосовувати метод визначення твердості за Брінеллем.

Після вибору методу випробування необхідно підготувати зразок для випробування. При використанні методу Брінелля зразок готують так, щоб його поверхні (випробовувана й опорна) були паралельні й не мали окалини, іржі й інших нерівностей, що впливають на результат випробування. Це досягається, за необхідності, обробленням різанням, зачисткою або обробленням вказаних поверхонь наждачним папером, наждачним кругом або напилком без розігрівання. Мінімальна товщина зразка має бути не менше 10-ти кратної глибини відбитка.

При визначенні твердості за Роквеллом поверхні зразків (випробовувана й опорна) зачищаються на дрібній наждачній шкурці або на дрібнозернистому шліфувальному крузі. Зачистка не мусить супроводжуватися нагрівом зразка вище 150°C. Опорна поверхня зразка має забезпечувати щільне і стійке прилягання його до опорного столика.

При визначенні твердості за методом Вікерса та мікротвердості випробовувану поверхню зразків обов'язково шліфують і полірують (іноді для визначення мікротвердості окремих зерен шліф піддають плавленню). Опорну поверхню достатньо зачистити на наждачному папері. При будь-якому методі випробування зразок не мусить зрушуватися, гойдатися або деформуватися, на ньому не має бути грубих подряпин, слідів попередніх випробувань.

Усі результати випробування твердості за Брінеллем вносяться в загальну табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати випробування твердості за Брінеллем

№ п/п	Матеріал	Наванта- ження, кгс	Діаметр кульки D , мм	Діаметр відбитка d , мм	Твердість, HB	Границя міцності σ_s , МПа
1	2	3	4	5	6	7

При аналізі даних, наведених у табл. 2.1, необхідно звернути увагу на те, як відрізняється твердість чорних металів і сплавів (сталь і чавун) від кольорових (мідь, латунь, бронза, дуралюмін тощо), а також розглянути відмінність у твердості чистих металів і їхніх сплавів.

При знайомстві з методом визначення твердості за Роквеллом необхідно провести випробування твердості зразків. Користуючись таблицею відповідності (Додаток Б), потрібно зіставити значення твердості за Брінеллем загартованих зразків і зразків, не підданих гартуванню. Отримані дані вписати в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати випробування твердості за Роквеллом

№ п/п	Матеріал	Навантаження, Н	Твердість, HRC	Значення твердості HB за таблицею
1	2	3	4	5

Аналіз результатів випробування треба навести у висновках цієї роботи.

2.6 Зміст звіту

1. Назва роботи та її мета.
2. Устаткування та матеріали, використані при виконанні роботи.
3. Короткий опис методів визначення твердості та сфери їх застосування.
4. Значення певного методу випробування для визначення властивостей металів і сплавів.
5. Таблиця експериментальних даних усієї підгрупи та висновки за цими даними.

2.7 Контрольні запитання

1. Що таке твердість?
2. Назвіть основні методи визначення твердості, зазначте переваги та недоліки кожного з них.
3. Як вимірюють твердість на твердомірах Брінелля, Роквелла та Вікерса?
4. Які індентори та навантаження застосовують при вимірюванні твердості різних металів за методами Брінелля, Роквелла та Вікерса?
5. Як впливає вміст вуглецю на твердість сталі в нормалізованому стані?

Рекомендована література

1. Афтанділянц Є Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство : підручник. К. : Вища освіта, 2012. 548 с.
2. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум : посібник для вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації / А.С. Опальчук, О.О. Котречко, Л.Л. Роговський, О.Є. Семеновський, І.Л. Роговський. К. : НУБіП України, 2015. 428 с.
3. Міщенко В. Г., Лоскутов С. В. Технології виробництва спеціальних сталей та їхні фізико-механічні властивості : монографія. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2023. 168 с.

3 Лабораторна робота № 3. ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ МЕТАЛІВ

3.1 Мета роботи

1. Вивчити будову й роботу маятникового копра та засвоїти методику визначення ударної в'язкості.
2. Дослідити вплив вуглецю на пластичну деформацію (відносно звуження) ударних зразків і ударну в'язкість вуглецевих сталей.

3.2 Матеріали й устаткування

Маятниковий копер; штангенциркуль; шаблон для встановлення ударного зразка на копрі. Зразки з U-подібним надрізом зі сталей марок: 10, 25, 45, У7, У10, У13 у нормалізованому стані.

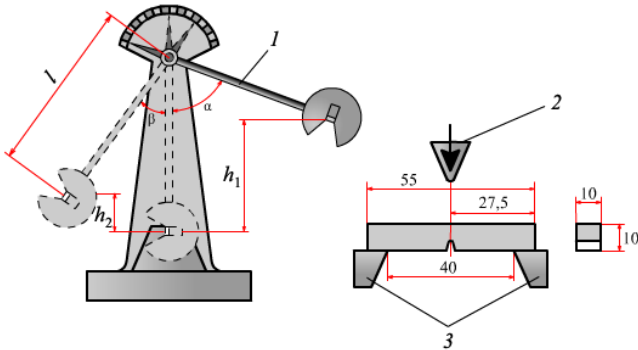
3.3 Основні положення

В умовах експлуатації багато деталей і конструкцій можуть крихко руйнуватися під дією ударних навантажень. Водночас, схильність металів до крихкого руйнування зростає при збільшенні прикладеного навантаження, зниженні температури, збільшенні розмірів зерна, наявності надрізів, підвищенні вмісту в сталі вуглецю, а також шкідливих домішок: фосфору, сірки, кисню, водню, азоту. Оскільки статичні випробування на розтяг не відбивають повністю опір матеріалів крихкому руйнуванню при ударних навантаженнях, застосовують динамічні випробування на ударний вигин, розтягування, стискування, крутіння тощо.

Найбільшого поширення набули динамічні випробування на ударний вигин зразків із надрізом-концентратором напружень (випробування на ударну в'язкість).

Ударні випробування на вигин проводять на маятникових копрах (рис. 3.1). Основою копра є дві опори, між якими знаходиться маятник, який рухається за допомогою шарикопідшипників і горизонтальної вісі, підвішеної до опор. На тій же вісі розміщена підйомна рама. Перед випробуваннями підйомну раму піднімають і закріплюють за допомогою храпового механізму. Далі маятник піднімають на визначену висоту і фіксують його на рамі в положенні «зарядка». У цьому положенні маятник має визначений запас енергії. Якщо відпустити маятник, то після падіння під дією сили ваги він зруйнує

встановлений на опорах зразок. Зупинка копра після руйнування зразка здійснюється гальмом. До маятника прикріплена мотузка, перекинута через блоки й натягнута вантажем. Після руйнування зразка, маятник знову почне рухатись у зворотному напрямку, гальмо зупинить його.



1 – маятник; 2 – ніж маятника; 3 – опори

Рисунок 3.1 – Схема випробувальної установки для визначення ударної в'язкості

Ударна в'язкість – характеристика металу, яка оцінюється роботою, витраченою на деформування і руйнування зразка та визначається як відношення роботи ударного руйнування вигином до площі поперечного перерізу зразка в місці надрізу (зразки крихких матеріалів випробують без надрізу).

Залежно від мети випробування зразки можуть мати надріз: U-подібний з радіусом надрізу 1 мм; V-подібний з радіусом 0,25 мм та у вигляді тріщини (рис. 3.2). Тому, у позначення в'язкості вводиться третій індекс: KCU, KCV, KCT відповідно.

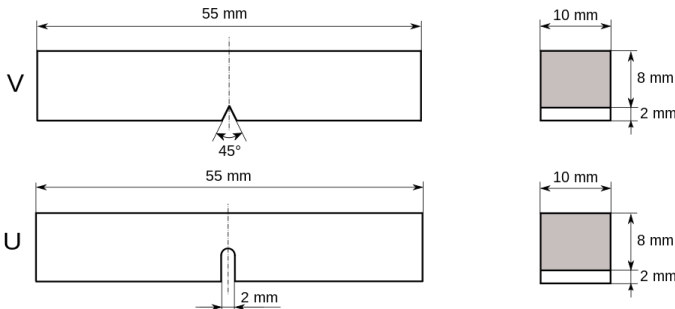


Рисунок 3.2 – Форма та розміри зразків для випробування на ударну в'язкість

У вихідному (верхньому) положенні маятник вагою P , піднятий на висоту H , м має потенційну енергію PH , Дж (рис. 3.3).

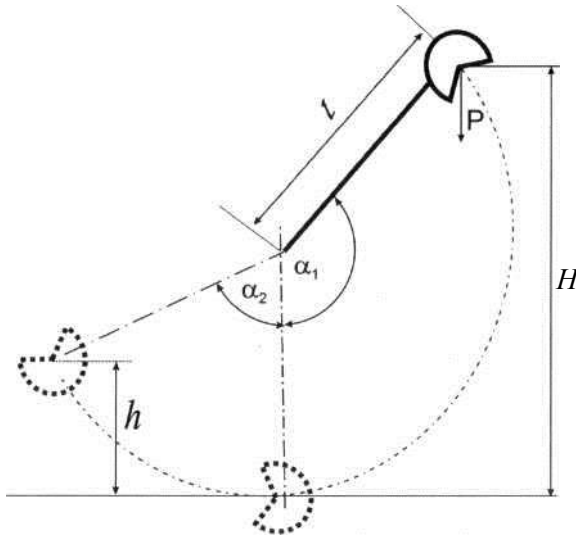


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема для визначення ударної в'язкості

Рухаючись вниз, маятник руйнує зразок, витративши на це певну частину енергії. Проте в нього ще залишається енергія Ph для підйому маятника на висоту h . Тому роботу руйнування K , Дж, визначають за формулою:

$$K = PH - Ph = Pl (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (3.1)$$

де l – довжина маятника, м;

α_1 та α_2 – кути підйому маятника до та після удару (руйнування зразка), град.

Під час проведення випробування маятник піднімають на заданий кут α_1 , а кут α_2 фіксується після руйнування на циферблаті копра. За даними постійної копра Pl , кутами α_1 і α_2 , використовуючи таблиці, знаходять роботу руйнування K , Дж. У конструкціях деяких копрів роботу руйнування визначають безпосередньо за приладом копра.

Ударну в'язкість визначають за формулою:

$$KC = \frac{K}{F}, \quad (3.2)$$

де F – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу (зазвичай $F = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$).

Ударна в'язкість при інших однакових обставинах залежить від здатності металу деформуватися під час випробування без руйнувань, тобто від його пластичності. Одним із показників, що характеризують пластичність металу, є зменшення поперечного перерізу зразка в площині руйнування після випробування. За цим параметром можна визначити відносне звуження ударного зразка:

$$\psi = \frac{(b_0 - b_1) \cdot 100\%}{b_0} \quad (3.3)$$

де b_0 і b_1 – ширина зразка відповідно до та після випробування, м.

3.4 Методичні рекомендації щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з правилами техніки безпеки при випробуванні ударної в'язкості.
2. Вивчити будову маятникового копра та методику визначення ударної в'язкості.
3. Виміряти зразки, провести їхнє випробування.
4. Для кожної марки сталі за результатами трьох випробування визначити середнє значення ударної в'язкості та відносного звуження.
5. Результати випробування записати в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Протокол випробування на ударну в'язкість

Марка сталі	Номер зразка	Розміри зразка			α_1 ,	α_2 ,	K ,	KCU ,	ψ ,
		b_0 , м	b_1 , м	F , м ²	град	град	Дж	Дж/м ²	%

6. За результатами випробування побудувати графічні залежності ударної в'язкості від вмісту вуглецю та відносного звуження зразків.

7. Зробити висновки про вплив вуглецю та пластичності на опір сталі руйнування при ударному навантаженні.

3.5 Зміст звіту

1. Назва роботи та її мета.

2. Основні положення з теми роботи.

3. Ескіз зразка, схема випробування на ударну в'язкість, протокол випробування.

4. Графічна залежність ударної в'язкості від вмісту вуглецю та від відносного звуження зразків.

5. Висновки про вплив вуглецю на ударну в'язкість, про характер залежності між в'язкістю і пластичністю за результатами оброблення експериментальних даних.

3.6 Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст ударної в'язкості?

2. На яких зразках визначають ударну в'язкість?

3. Наведіть формулу для визначення ударної в'язкості.

4. Як залежить ударна в'язкість від форми надрізу?

5. Як впливає температура випробування на ударну в'язкість?

6. Які елементи, що входять у хімічний склад сталі, знижують ударну в'язкість?

Рекомендована література

1. Афтанділянц Є Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство : підручник. К. : Вища освіта, 2012. 548 с.

2. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І. Матеріалознавство : підручник. Харків : ХНАДУ, 2007. 440 с.

3. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум : посібник для вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації / А.С. Опальчук, О.О. Котречко,

Л.Л. Роговський, О.Є. Семеновський, І.Л. Роговський. К. : НУБіП України, 2015. 428 с.

4. Міщенко В. Г., Лоскутов С. В. Технології виробництва спеціальних сталей та їхні фізико-механічні властивості : монографія. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2023. 168 с.

5. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів : підручник. К. : Знання, 2016. 400 с.

4 Лабораторна робота № 4. ДІАГРАМИ СТАНУ ТА ТЕРМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ СПЛАВІВ

4.1 Мета роботи

1. Вивчити основні різновиди діаграм стану подвійних сплавів.
2. Навчитися визначати за діаграмою стану можливість проведення термічного оброблення сплавів, їхнє зміцнення.

4.2 Послідовність виконання роботи

1. Прочитайте уважно теоретичні відомості про діаграми стану сплавів, термічне оброблення та його вплив на властивості сплавів.
2. Виконайте всі пункти завдання, зазначені викладачем. Проаналізуйте отримані результати та зробіть висновки щодо можливості використання діаграм стану для практичної роботи зі сплавами.
3. Поясніть, які сплави металевих систем можуть піддаватися зміцнювальному термічному обробленню.

4.3 Основні положення

Для практичної роботи з подвійними сплавами необхідно знати їхню структуру, можливість її зміни зі зміною температури та складу сплаву. Відповідно, можна зробити висновки щодо властивостей сплавів і можливості зміни властивостей у потрібному напрямку. Необхідність змінити структуру і властивості сплавів може виникнути, якщо при отриманні деталі методом лиття сталася внутрішньокристалічна ліквідація, якщо треба зміцнити сплав термічним обробленням, і в деяких інших випадках. Для визначення можливості проведення термічного оброблення і призначення її температурного режиму треба знати закономірності зміни фазового складу залежно від температури та хімічного складу сплаву в цій системі. Графічна залежність, що містить цю інформацію, і є діаграмою стану. Діаграми стану дають змогу отримувати різнобічну інформацію про сплави. З їх допомогою можна зробити висновки щодо ливарних властивостей сплавів і, відповідно, можливості отримання з них виливка, схильності сплавів до внутрішньокристалічної ліквідації та ліквідації за питомою вагою при кристалізації, пластичності різних сплавів і можливості їх пластичної деформації при виготовленні виробів.

Найчастіше для побудови діаграм стану металевих систем використовують термічний аналіз, що ґрунтується на тому, що плавлення, кристалізація і всі структурні зміни сплавів у твердому стані відбуваються з тепловими ефектами (з поглинанням або виділенням тепла). Отже, знімаючи криві нагріву або охолодження сплавів різного складу якої-небудь системи, можна зафіксувати температури, при яких відбуваються ті або інші зміни в структурі. Якщо потім цю інформацію представити графічно в координатах «температура – склад сплаву», то вийде діаграма стану системи.

Залежно від характеру взаємодії компонентів у сплаві, відповідності або відмінності в їхній атомно-кристалічній будові можливе утворення різних фаз: твердих розчинів, фазових сумішей кристалів окремих компонентів, хімічних сполук тощо. Ця взаємодія описується різними видами діаграм стану з різними можливостями зміни структури та проведення термічного оброблення сплавів.

Основні різновиди таких діаграм розглядаються в загальному вигляді нижче.

Типи подвійних діаграм

У цій системі в рідкому стані компоненти A і B розчиняються один в одному, а у твердому не розчиняються. На вертикальній осі на діаграмах завжди відкладається температура, а на горизонтальній – склад сплаву у відсотках. На приведеній діаграмі в точці x_1 міститься 100 % компонента A , праворуч від цієї точки збільшується кількість компонента B у сплавах, і в точці x_3 міститься 100 % компонента B (рис. 4.1). Точка a відповідає температурі плавлення компонента A , а точка c – компонента B .

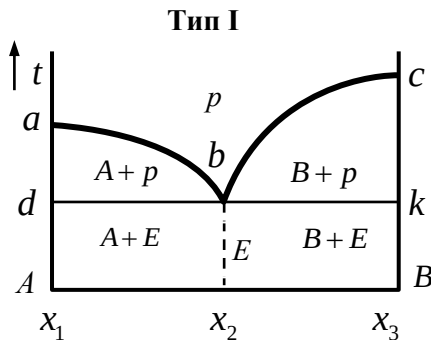


Рисунок 4.1 – Діаграма з повною нерозчинністю компонентів у твердому стані

Якщо розглядати діаграму при пониженні температури (зверху вниз), то перетин кожної лінії відповідає зміні фазового стану, будови сплавів цієї системи. На рис. 4.1 лінія abc є геометричним місцем температур початку кристалізації сплавів і називається лінією ліквідус. Вище за цю лінію всі сплави системи $A - B$ знаходяться в рідкому стані.

Лінія dbk є геометричним місцем температур кінця кристалізації й називається лінією солідус. Нижче неї всі сплави знаходяться у твердому стані. Отже, між лініями ліквідус і солідус сплав знаходиться у двофазному стані (і рідкому, і твердому), тобто в областях $adba$ і $bckb$ відбуваються процеси кристалізації (при охолодженні) і плавлення (при нагріванні).

При охолодженні з рідкого стану на лініях ab і bc починається процес кристалізації. Оскільки компоненти цієї системи не розчиняються один в одному й хімічно не взаємодіють, то при кристалізації утворюються кристали чистих компонентів. Причому, в області $abda$ сприятливіші умови для утворення в рідині зародків компонента A і зростання з них кристалів, а в області $bckb$ – компонента B . Тому на лінії ab починається кристалізація компонента A , а на лінії bc – компонента B . При подальшому пониженні температури ці процеси тривають до лінії солідус dbk .

Точка b на діаграмі називається евтектичною, вона належить одночасно лінії ab і лінії bc . При кристалізації сплаву евтектичного складу (x_2) у точці b одночасно формуються кристали компонентів A і B , внаслідок чого утворюється дрібна фазова суміш кристалів A і B , яка називається евтектикою. Евтектика зберігається в цьому сплаві і при подальшому охолодженні у твердому стані.

При кристалізації компонентів A і B в областях $abda$ і $bckb$ склад рідини, що залишилася, безперервно змінюється. У першому випадку вона збіднюється компонентом A , у другому – B . Коли охолодження доходить до лінії dbk , склад рідини, що залишилася, стає подібним евтектичному (x_2). Тому на лінії dbk , так само як і в точці b , кристалізується евтектика.

У твердому стані (нижче лінії dbk) структура доевтектичних сплавів (в інтервалі концентрацій $x_1 - x_2$) складатиметься з кристалів компонента A й евтектики, структура евтектичного сплаву (складу x_2) – з однієї евтектики, структура заевтектичних сплавів (у інтервалі концентрацій $x_2 - x_3$) – з кристалів компонента B і евтектики. Подальше

оохолодження у твердому стані не призводить до деяких змін у структурі, оскільки ніяких ліній у нижній частині діаграми немає.

Оцінимо можливість термічного оброблення сплавів системи з повною нерозчинністю компонентів у твердому стані.

Термічним обробленням називають зміну структури та властивостей сплавів шляхом нагріву їх до певної температури, витримки й охолодження з необхідною швидкістю. Якщо подивитися на діаграму, зображену на рис. 4.1, то видно, що нагрів і охолодження сплавів цієї системи у твердому стані не призводять до зміни структури, а тому, – і властивостей. Це свідчить, що зміцнювальне термічне оброблення сплавів подібних систем неможливе.

У випадку, коли компоненти C і D розчиняються один в одному у твердому стані в усьому інтервалі концентрацій від 0 до 100 % треба розглядати діаграму системи сплавів $C - D$ (рис. 4.2). Точки a і b – температури плавлення (кристалізації) компонентів C і D відповідно. Верхня лінія є лінією ліквідус, тому, вище неї всі сплави цієї системи знаходяться в рідкому стані. Нижня лінія – лінія солідус, нижче якої всі сплави знаходяться у твердому стані. Кристалізація при охолодженні рідини починається на лінії ліквідус, за такої умови утворюються кристали твердого розчину C в D (чи D в C), закінчується цей процес на лінії солідус. Нижче солідусу, тобто у твердому стані, структура сплавів – це кристали твердого розчину заміщення. При подальшому охолодженні до кімнатної температури змін у структурі не відбувається. Оскільки нагрів і охолодження сплавів цієї системи у твердому стані не призводять до зміни структури, зміцнювальне термічне оброблення сплавів подібних систем неможливе.

Тип II

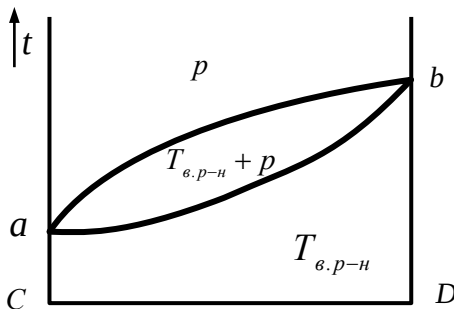


Рисунок 4.2 – Діаграма з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані

Якщо в процесі кристалізації відбулась внутрішньокристалічна ліквідація, то усунути або зменшити неоднорідність хімічного складу в сплаві можна термічним обробленням – дифузійним відпалом (чи гомогенізацією). Для цього необхідно нагріти сплав до високих температур, щоб прискорити дифузійні процеси, витримати при цих температурах тривалий час (години або десятки годин) наступним повільним охолодженням. Режим дифузійного відпалу наведено на рис. 4.3 (заштрихований інтервал температур).

Тип II а

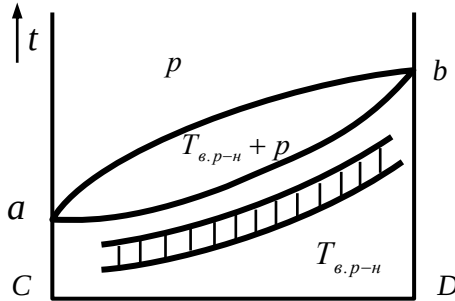


Рисунок 4.3 – Область визначення відпалу на діаграмі з необмеженою розчинністю

У системі, зображеній на рис. 4.4, компонент K у компоненті M у твердому стані не розчиняється, а M у K розчиняється в обмежених кількостях. Позначимо твердий розчин компонента M у K буквою α . Такий твердий розчин з обмеженою розчинністю може утворитися як за типом заміщення, так і за типом впровадження. При температурі t_1 у твердому розчині α може розчинитися x_2 компонента M , а при кімнатній температурі – x_1 , тобто з пониженням температури розчинність M у твердому розчині α зменшується.

Лінія abc – ліквідус діаграми, тому, при вищих температурах усі сплави цієї системи знаходяться в рідкому стані.

Лінія $adbf$ – солідус, нижче неї сплави знаходяться в твердому стані.

При охолодженні доєвтектичних сплавів (з концентрацією компонента M до x_3) в області $abda$ відбуватиметься кристалізація твердого розчину α , а в заєвтектичних сплавах (з концентрацією M більше x_3) в області $bcfb$ – кристалізація компонента M . Водночас у сплавах із концентрацією M до x_2 кристалізація закінчується на лінії ad

формуванням структури, що повністю складається з кристалів твердого розчину α , яка зберігається і при подальшому охолодженні. Точка b на діаграмі – евтектична. У сплаві евтектичного складу (x_3) в точці b при постійній температурі t_1 відбувається кристалізація евтектики, яка є сумішшю дрібних кристалів твердого розчину α і компонента M . Якщо проаналізувати процеси, що відбуваються при кристалізації в областях $abda$ і $bcfb$, то стає зрозумілим, що склад рідини тут безперервно змінюється, і при температурі t_1 (на лінії dbf) стає евтектичним. Отже, на лінії dbf з рідини евтектичного складу кристалізується евтектика, яка зберігається в сплавах при подальшому охолодженні.

Тип III

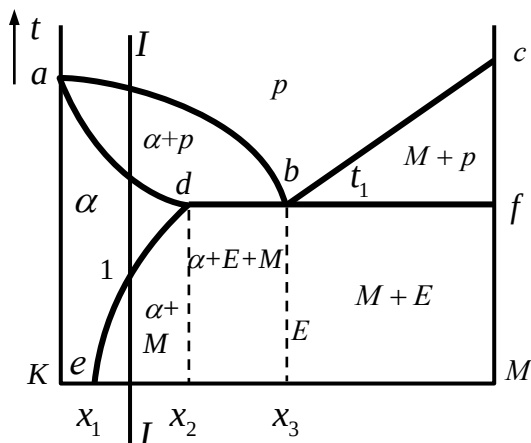


Рисунок 4.4 – Діаграма стану з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані

Лінія de на діаграмі показує граничну розчинність компонента M у твердому розчині α , що знижується зі зменшенням температури від x_2 до x_1 (рис. 4.4). Тому при охолодженні доєвтектичних сплавів нижче лінії de з твердого розчину α виділятимуться надмірні атоми компонента M з утворенням дрібних кристалів (часток) цього компонента. Ці частки при повільному охолодженні будуть рости, збільшуватись. Такий самий процес відбуватиметься і в сплавах складу $x_2 - x_3$. Це означає, що в них при температурах нижче лінії db теж виділятимуться частки компонента M .

Для систем із твердими розчинами з обмеженою розчинністю компонентів, залежною від температури (подібних до системи на рис. 4.4), можливе зміцнювальне термічне оброблення. Суть його полягає в наступному. Якщо взяти сплав складу 1 – І зі структурою, що складається з кристалів α і часток M , нагрівати його до температури точки 1 (вище за лінію de), витримати при цій температурі, щоб усі частки M розчинилися у твердому розчині α , і швидко охолодити, то компонент M не встигне виділитися з твердого розчину. Після охолодження структура сплаву буде пересиченим твердим розчином α' . Цей процес називається гартуванням. При витримці загартованого сплаву при кімнатній або дещо підвищеній температурі з пересиченого твердого розчину виділятиметься надмірний компонент M з утворенням дисперсних (дуже дрібних) часток: $\alpha' \rightarrow \alpha + M_{дисп.}$ Такий процес називається старінням (при кімнатній температурі – природне старіння, а при підвищених температурах – штучне).

Дрібнодисперсні частки, що утворюються при старінні, є ефективними перешкодами для руху дислокацій і тим самим зміцнюють сплав, підвищують його характеристики міцності. Отже, зміцнювальне термічне оброблення сплавів подібних систем полягає в гартуванні та старінні. У реальних сплавах трапляються варіанти, коли обидва компоненти обмежено розчиняються один в одному у твердому стані. У цьому випадку в системі буде два тверді розчини. Приклад такої діаграми показаний на рис. 4.5.

Тип IV

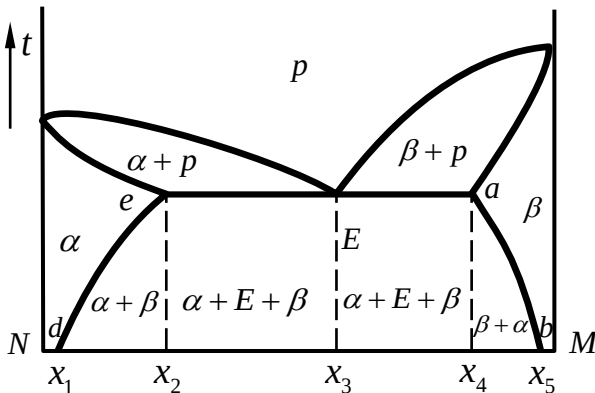


Рисунок 4.5 – Діаграма стану з обмеженою розчинністю обох компонентів один в одному

Тут є твердий розчин M в $N(\alpha)$ і твердий розчин N в $M(\beta)$. Лінії de й ab показують, відповідно, граничну розчинність компонентів M і N у твердих розчинах α і β залежно від температури. Сплави такої системи також можуть піддаватися зміцнювальному термічному обробленню (гартуванню і старінню). Якщо розчинність компонента у твердому розчині не залежить від температури, то термічне оброблення (гартування) стає неможливим, оскільки не можна отримати пересичений твердий розчин, необхідний для утворення при подальшому старінні дисперсної зміцнювальної фази. Приклад такої діаграми показаний на рис. 4.6. Тут концентрація компонента P у твердому розчині α постійна й рівна x_1 .

Тип V

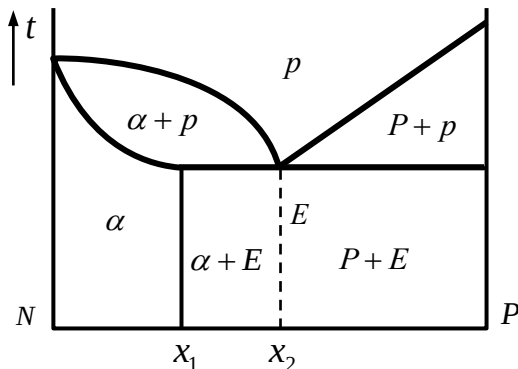


Рисунок 4.6 – Діаграма стану, в якій розчинність одного з компонентів не залежить від температури

Якщо в процесі кристалізації компоненти утворюють стійку хімічну сполуку, то вона грає роль самостійного компонента в системі. З урахуванням цього, будь-яку діаграму з хімічною сполукою можна аналізувати, розклавши її умовно на простіші діаграми, аналогічні розглянутим вище.

На рис. 4.7 показана діаграма з утворенням хімічної сполуки A_mD_n між компонентами A і D . Цю діаграму умовно можна розділити на дві простих діаграми: $A - A_mD_n$ і $A_mD_n - D$ (лінії ліквідус abc і cdf , лінії солідус kbm і $ndef$). Перша з них – типова діаграма з повною нерозчинністю компонентів у твердому стані, а друга – діаграма з обмеженою розчинністю компонентів. З урахуванням цього і вказані фази в областях діаграми на рис. 4.7.

У цій системі 2 евтектики (точки b і d); одна з них E_1 – складається з кристалів $A + A_mD_n$, а інша E_2 – з кристалів $A_mD_n + \alpha$. Компонент A обмежено розчиняється в D з утворенням твердого розчину α . Як видно з рис. 4.7, для сплавів у правій частині системи можливе зміцнювальне термічне оброблення (гартування і старіння).

Тип VI

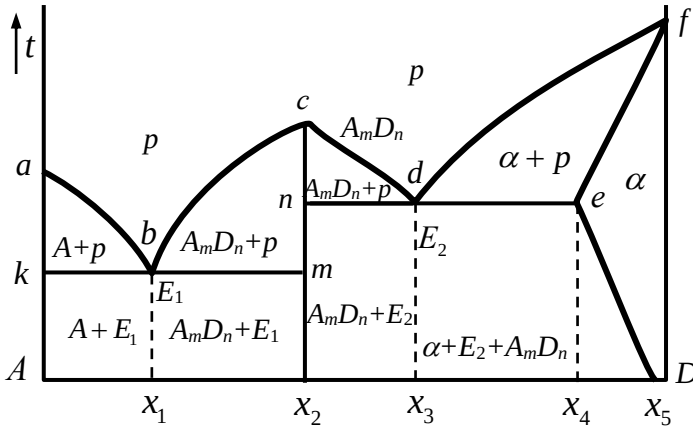


Рисунок 4.7 – Діаграма стану з утворенням хімічної сполуки між компонентами

Якщо один або обидва компоненти при нагріванні й охолодженні у твердому стані міняють свою кристалічну будову, то це позначається на вигляді діаграми. На ній з'являються додаткові лінії, що характеризують зміну кристалічної ґратки компонентів та їхню взаємодію після такої зміни з утворенням нових фаз у твердому стані. Така діаграма показана на рис. 4.8.

Для зручності розгляду цю діаграму умовно можна розділити на дві, перша з яких – верхня частина діаграми, що показує процеси, які ідуть при кристалізації рідини (згори й до лінії cdf). Це діаграма з повною розчинністю компонентів у твердому стані. Друга умовна діаграма – це нижня частина системи $B-K$, що показує процеси, які проходять у сплавах у твердому стані (нижче лінії солідус ab). Це діаграма з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані.

Тип VII

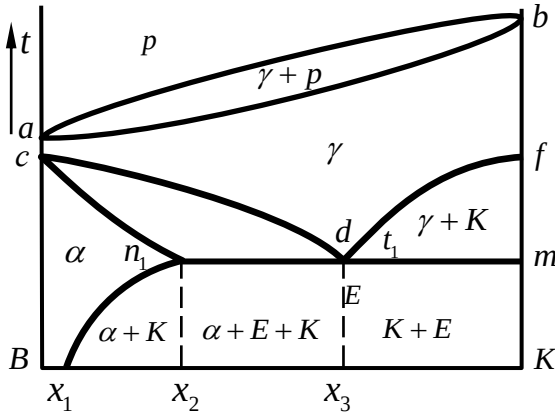


Рисунок 4.8 – Діаграма стану з фазовим перетворенням у твердому стані

При розгляді цих умовних простих діаграм треба використати вище викладений матеріал. У системі $B - K$ є два типи твердих розчинів: γ – твердий розчин з необмеженою розчинністю компонентів і α – твердий розчин із обмеженою розчинністю компонента K у B . Межа розчинності складає x_2 при температурі t_1 і x_1 при кімнатній температурі. Відрізняються ці тверді розчини кристалічною будовою.

У точці c відбувається зміна кристалічної ґратки компонента B , а в точці f – компонента K . При охолодженні сплавів на лінії cdf починається перетворення твердого розчину γ в інші фази (у зв'язку зі зміною кристалічної ґратки компонентів). Водночас у сплавах із концентрацією до x_3 (ліва частина діаграми) утворюються кристали твердого розчину α , а в сплавах із концентрацією K більше x_3 – кристали компонента K . Закінчується це перетворення γ на лінії md при температурі t_1 утворенням механічної суміші типу евтектичної (така суміш називається евтектоїдною) з кристалів твердого розчину α і компонента K . Лінія md показує граничну розчинність K у твердому розчині α залежно від температури.

Як видно з рис. 4.8, для сплавів таких систем можна проводити зміцнювальне термічне оброблення.

4.4 Методичні рекомендації щодо виконання лабораторної роботи

Розглянути детально діаграму стану сплаву за вказівкою викладача – з аналізом процесів, що йдуть при охолодженні або нагріванні сплавів, аналізом фаз, які утворюються в усіх областях діаграми, поясненням значення ліній на діаграмі.

Рекомендована література

1. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство : підручник. К. : Вища освіта, 2012. 548 с.
2. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І. Матеріалознавство : підручник. Харків : ХНАДУ, 2007. 440 с.
3. Міщенко В. Г., Лоскутов С. В. Технології виробництва спеціальних сталей та їхні фізико-механічні властивості : монографія. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2023. 168 с.
4. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : Практикум : навч. посібник / В.В. Попович, А.І. Кондир, Е.І. Плешаков та ін. Львів : Світ, 2009. 552 с.

5 Лабораторна робота № 5. МІКРОСТРУКТУРА ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

5.1 Мета роботи

Вивчення мікроструктури вуглецевих сталей після відпалу.

5.2 Матеріали й устаткування

1. Металографічні мікроскопи.
2. Колекція шліфів сталей.
3. Альбом фотографій мікроструктур вуглецевих сталей.
4. Діаграма Fe – Fe₃C.

5.3 Послідовність виконання роботи

1. Вивчити зміст основних положень роботи.
2. Розібратися за допомогою тренажера зі сталевою частиною діаграми Fe – Fe₃C.
3. Здобути навички визначення під мікроскопом елементів структури сталі: фериту, цементиту, перліту. Із цією метою розглянути:
 - фотографії мікроструктур в альбомі;
 - підібрані шліфи під мікроскопом для вивчення структурних складових і відобразити схеми розглянутих структур.
4. Вивчити мікроструктуру трьох-чотирьох зразків, що належать різним класам сталей (доевтектоїдні, евтектоїдні, заевтектоїдні), визначити до якого з названих класів належить кожен зразок. Накреслити схему мікроструктури розглянутих зразків і позначити на рисунках структурні складові.
5. У зразку доевтектоїдної сталі визначити вміст вуглецю в % мас.

5.4 Основні положення

На діаграмі стану залізо-вуглець сплави, що належать до сталей, розташовані в інтервалі концентрацій вуглецю до 2,14 % тобто ліворуч від точки *E* (рис. 5.1). При температурах нижче 727°C усі вуглецеві

сталі після відпалу складаються з двох фаз – фериту й цементиту. *Ферит* – це твердий розчин вуглецю в залізі з об'ємно-центрованими кубічними ґратками (αFe). Максимальна розчинність вуглецю в αFe складає приблизно 0,02 % (точка P). *Цементит* – це карбід заліза Fe_3C , що містить 6,67 % C.

При температурах вище за лінію GSE рівноважною фазою є *аустеніт* – твердий розчин вуглецю в залізі з гранецентрованими кубічними ґратками (Fe_γ). Гранична розчинність вуглецю в Fe_γ – 2,14 % (точка E).

У результаті фазових перетворень у твердому стані при малих швидкостях охолодження в сталі утворюються такі структури: перліт, надмірний ферит, вторинний цементит і третинний цементит.

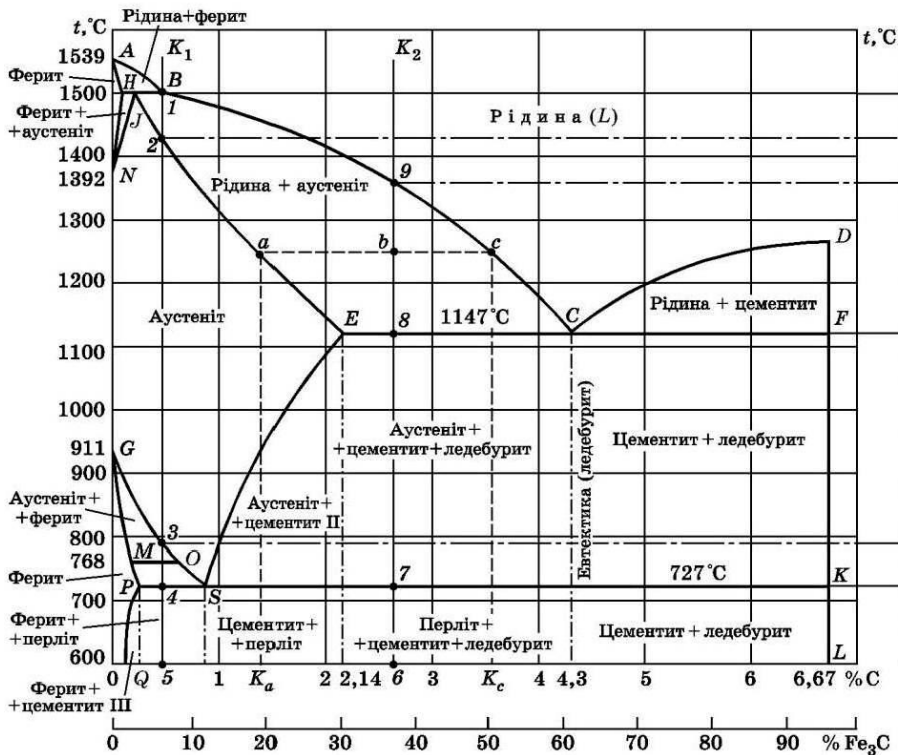


Рисунок 5.1 – Діаграма Fe – Fe₃C

На лінії *GS* з аустеніту починає виділятися надмірний ферит, а на лінії *SE* – вторинний цементит. На лінії *PQ* з фериту виділяється третинний цементит. В усіх сплавах праворуч від точки *P* при невеликому переохолодженні до температур нижче 727°C аустеніт евтектоїдного складу (0,8 % C) розпадається на евтектоїдну суміш фериту й цементиту, що називається перлітом, причому цементит може бути у вигляді пластинок або зерен (див. атлас структур).

Сталь, що містить 0,8 % C, називають евтектоїдною. Сталі, що містять менше ніж 0,8 % C називають доевтектоїдними, а понад 0,8 % C – заевтектоїдними.

Металографічний аналіз металів і сплавів полягає в дослідженні структури матеріалів при великих збільшеннях за допомогою мікроскопу, а спостережувана структура називається мікроструктурою. Вивчення під мікроскопом структури металів можливо лише при досить інтенсивному відображенні світових променів від досліджуваної поверхні. Тому поверхня зразка має бути спеціально підготовлена. Зразок, поверхня якого підготовлена для металографічного аналізу, називається мікрошліфом.

Для виготовлення мікрошліфа необхідно вирізати зразок із досліджуваного металу, отримати на ньому плоску, блискучу поверхню, а потім шліф щавлять. Є декілька методів щавлення, з яких найбільш поширений метод вибіркового розчинення фаз. Метод ґрунтується на відмінності фізико-хімічних властивостей окремих фаз і граничних ділянок зерен. У результаті різної інтенсивності розчинення створюється рельєф поверхні шліфа. Для щавлення мікрошліф занурюють полірованою поверхнею в розчин обраного складу й через деякий час виймають. Якщо полірована поверхня стане злегка матовою, щавлення вважається закінченим, шліф відразу ж промивають водою, потім спиртом і висушують фільтрувальним папером.

Мікрошліфи сталей щавлять 3–4 % розчином HNO_3 у спирті, після чого структурно вільний ферит і цементит у порівнянні з темним (коричневим) перлітом виглядають білими.

При охолодженні доевтектоїдної сталі з аустеніту спочатку виділяється ферит. Розмір феритних зерен значною мірою залежить від швидкості охолодження аустеніту. При розгляді в мікроскоп ферит спостерігається у вигляді світлих зерен різної яскравості (див. атлас

структур). Зі збільшенням концентрації вуглецю в доєвтектоїдній сталі кількість зерен фериту зменшується (див. атлас структур), а кількість перліту збільшується. У сплавах, що містять 0,5–0,75 % С зерна фериту розташовуються по межах зерен іншої структурної складової – перліту – у вигляді розірваної сітки (див. атлас структур).

У доєвтектоїдній сталі перліт здебільшого має пластинчасту будову. Темні пластинки, видимі в перліті, є тінями, що відкидаються на ділянки фериту ділянками цементиту, який виступає після щавлення. Форма виділення перліту в доєвтектоїдних і заєвтектоїдних сталях визначається умовами проведення відпалу. Форма й розмір часток цементиту в перліті істотно впливають на властивості сталі. Так, наприклад, зернистий перліт пластичніший і має меншу твердість, ніж пластинчастий. Твердість зернистого перліту 160–220 НВ, а пластинчастого – 200–250 НВ. Зі зменшенням розміру цементитних часток твердість і міцність перліту зростає. Форма цементитних часток впливає на оброблюваність сталі різанням. Доєвтектоїдні сталі добре обробляються різанням, якщо мають структуру пластинчастого перліту, а евтектоїдні та заєвтектоїдні – зернистого.

У заєвтектоїдних сталях можливе виділення вторинного цементиту у вигляді сітки по межах зерен перліту (див. атлас структур). Це відбувається в результаті закінчення гарячого оброблення при надмірно високій температурі і є значним дефектом заєвтектоїдної сталі, погіршує її міцність і в'язкість. Ще однією формою виділення цементиту, що рідко трапляються, є його утворення у вигляді голок (внаслідок значного перегрівання). Це значно погіршує механічні властивості цементиту.

Отже, можна виділити чотири типи структур сталей.

Перший тип структури – ферит і третинний цементит – спостерігається в низьковуглецевих сталях, що містять до 0,02 % С (т. Р). Такі сталі називаються технічним залізом.

Другий тип структури – ферит і перліт – спостерігається в доєвтектоїдних сталях, що містять від 0,02 до 0,8 % С (т. S). Чим більше в доєвтектоїдній сталі вуглецю, тим більше в ній перліту.

Третій тип структури – перліт – спостерігається в евтектоїдній сталі, що містить 0,8 % С.

Четвертий тип структури – вторинний цементит і перліт – спостерігається в заєвтектоїдній сталі з вмістом вуглецю від 0,8 % до 2,14 % т. E).

Відмінність мікроструктури доєвтектоїдних сталей від заєвтектоїдних

У доєвтектоїдних і заєвтектоїдних сталях є одна загальна для обох типів структур складова – перліт. Відрізнити при мікроаналізі до- і заєвтектоїдні сталі один від одного можна тільки за надмірними виділеннями: якщо в структурі знаходиться надмірний ферит, то сталь доєвтектоїдна, а якщо вторинний цементит, то сталь заєвтектоїдна.

Є три металографічні способи відрізнити доєвтектоїдні сталі від заєвтектоїдних.

1-й спосіб. При щавленні розчином азотної кислоти надмірний ферит і цементит мають світлий відтінок. Відносна вагова кількість надмірного фериту в доєвтектоїдних сталях може змінюватися від 100 % (сталь складу точки *P*) до 0 % сталі складу точки *S*). Водночас кількість вторинного цементиту в заєвтектоїдних сталях може змінюватися у вузьких межах – від 0 % (сталь складу точки *S*) до 20 % (сталь складу точки *E*).

Отже, якщо в сталі, після відпалу, разом із темним перлітом, виявляється світла складова, що займає понад 20 % всієї площі поля шліфа, видимого в мікроскоп, то ця складова є надмірним феритом. Тому сталь – доєвтектоїдна.

2-й спосіб. Якщо відносна кількість світлої складової менше ніж 20 % або якщо при мікроаналізі важко зробити кількісну оцінку, то ця світла складова може виявитися як надмірним феритом, так і вторинним цементитом. У цьому випадку треба використати індикаторний щавник – гарячий лужний розчин пікрату натрію, який забарвлює цементит у темно-коричневий колір, залишаючи ферит світлим.

3-й спосіб. Якщо надмірна фаза займає менше ніж 20 % площі шліфа, вищавленого азотною кислотою, то за наявності деякого досвіду можна відрізнити вторинний цементит від надмірного фериту за формою і відтінку виділень.

Сітка надмірного фериту після відпалу складена з окремих зерен, тоді як вторинний цементит на шліфі виявляється у вигляді майже безперервної сітки. Сітка вторинного цементиту виступає над перлітом у вигляді рельєфу, оскільки твердий цементит після полірування трохи височіє над м'якшим і сильніше полірованим перлітом. Вторинний цементит може виділятися з аустеніту також у вигляді ізольованих

голою, як по межах, так і всередині колоній перліту. Нарешті, цементит виглядає під мікроскопом світлішим у порівнянні з феритом.

Металографічне визначення вуглецю в сталях після відпалу

Якщо вуглецева сталь добре відпалена, тобто приведена в рівноважний стан, то мікроструктурним аналізом можна визначити вміст у ній вуглецю.

Такі визначення фактично виконуються тільки для доєвтектоїдних сталей, оскільки в заєвтектоїдних сталях значна зміна у вмісті вуглецю мала й майже непомітно змінює мікроструктуру.

Вуглець у доєвтектоїдній сталі розподілений між надмірним феритом і перлітом. У фериті містяться тисячні долі відсотка вуглецю, якими можна нехтувати та вважати, що практично увесь вуглець у доєвтектоїдній сталі знаходиться в перліті. У перліті міститься 0,8 % С. У доєвтектоїдній сталі на перліт приходить тільки частина сплаву, і вміст вуглецю у вагових відсотках пропорційний площі шліфа, зайнятий перлітом. Ця пропорція витікає із приблизної рівності питомої ваги фериту й перліту; у протилежному випадку за мікроструктурою можна було б зробити висновки тільки щодо об'ємного співвідношення. Вміст вуглецю в доєвтектоїдній сталі:

$$\% C = 0,8 \cdot F_n / 100, \quad (5.1)$$

де F_n – площа, зайнята перлітом (у полі зору мікроскопа).

Найчастіше F_n оцінюють на око. Такий метод може здатися занадто неточним; насправді ж він дає добрі результати. Якщо абсолютна похибка в оцінці площі, займаної перлітом, складає 10 % то абсолютна похибка у визначенні вмісту вуглецю складає всього 0,08 %.

5.5 Зміст звіту

1. Назва роботи та її мета.
2. Основні положення з теми роботи (коротко).
3. Опис окремих стадій виконання роботи з вказівкою використовуваного устаткування, з необхідними поясненнями, цифровими даними, рисунками мікроструктур і їхніми описами.
4. Висновки.

5.6 Контрольні запитання

1. Який вміст вуглецю в евтектоїдній сталі?
2. Яку кристалічну ґратку мають α - і γ -залізо?
3. Що таке аустеніт, ферит, перліт, цементит?
4. Вкажіть назви областей на сталевій частині діаграми.
5. Які процеси відбуваються в сталі при її охолодженні в області 727°C?
6. Який максимальний вміст вуглецю в аустеніті?
7. Який максимальний вміст вуглецю у фериті?
8. Як впливає вміст вуглецю на властивості сталі?

Рекомендована література

1. Афтандіянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство : підручник. К. : Вища освіта, 2012. 548 с.
2. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І. Матеріалознавство : підручник. Харків : ХНАДУ, 2007. 440 с.
3. Кузін О. А., Яцюк Р. А. Металознавство та термічна обробка металів : підручник. Львів : Афіша, 2002. 304 с.
4. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум : посібник для вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації / А.С. Опальчук, О.О. Котречко, Л.Л. Роговський, О.Є. Семеновський, І.Л. Роговський. К. : НУБіП України, 2015. 428 с.
5. Міщенко В. Г., Лоскутов С. В. Технології виробництва спеціальних сталей та їхні фізико-механічні властивості : монографія. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2023. 168 с.
6. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : Практикум : навч. посібник / В.В. Попович, А.І. Кондир, Е.І. Плешаков та ін. Львів : Світ, 2009. 552 с.
7. Mishchenko V., Loskutov S. Physical and mechanical laws of metals structure formation in the processes of treatment and deformation Structuring and Mechanical Properties : Monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. 184 p.

Додаток А
Таблиця визначення твердості за Брінеллем

Діаметр відбитка d_{10} , $2d_5$ або $4d_{2,5}$	Число твердості за Брінеллем при навантаженні P (кгс)			Діаметр відбитка d_{10} , $2d_5$ або $4d_{2,5}$	Число твердості за Брінеллем при навантаженні P (кгс)		
	$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$
2,00	955			4,00	229	76,3	19,1
2,05	910			4,05	223	74,3	18,6
2,10	868			4,10	217	72,4	18,1
2,15				4,20	207	68,8	17,2
2,20	764			4,25	201	67,1	16,8
2,25	735			4,30	197	65,5	16,4
2,30	707			4,35	192	63,8	16,0
2,35	682			4,40	187	62,4	15,6
2,40	659			4,45	183	60,9	15,2
2,45	616			4,50	179	59,5	14,9
2,50	597			4,55	174	58,1	14,5
2,55	579			4,60	170	56,8	14,2
2,60	562			4,65	167	55,5	13,9
2,65	531			4,70	163	54,3	13,6
2,70	516			4,75	159	53,0	13,3
2,75	489			4,80	156	51,9	13,0
2,80	477			4,85	152	50,7	12,7
2,85	455			4,90	149	49,6	12,4
2,90	444			4,95	146	48,6	12,2
2,95	429			5,00	143	47,5	11,9
3,00	415		34,6	5,05	140	46,5	11,6
3,05	401		33,4	5,10	137	45,5	11,4
3,10	388	129	32,3	5,15	134	44,6	11,2
3,15	375	125	31,3	5,20	131	43,7	10,9
3,20	363	121	30,3	5,25	128	42,8	10,7
3,25	352	117	29,3	5,30	126	41,9	10,5
3,30	341	114	28,4	5,35	123	41,0	10,3
3,35	331	110	27,6	5,40	121	40,2	10,1
3,40	321	107	26,7	5,45	118	39,4	9,86
3,45	311	104	25,9	5,50	116	38,6	9,66
3,50	302	101	25,2	5,55	114	37,9	9,46
3,55	293	97,7	24,5	5,60	111	37,1	9,27

3,60	285	95,0	23,7	5,65	109	36,4	9,10
3,65	277	92,3	23,1	5,70	107	35,7	8,93
3,70	269	89,7	22,4	5,75	105	35,0	8,76
3,75	262	87,2	21,8	5,80	103	34,3	8,59
3,80	255	84,9	21,2	5,85	101	33,7	8,43
3,85	248	82,6	20,7	5,90	99,2	33,1	8,26
3,90	241	80,4	20,1	5,95	97,3	32,4	8,11
3,95	235	78,3	19,6	6,00	95,5	31,8	7,96

Додаток Б
Таблиця відповідності значень твердості

<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>	<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>
240	228	20,3	60,7	510	475	49,8	75,7
245	233	21,3	61,2	520	483	50,5	76,1
250	237	22,2	61,6	530	492	51,1	76,4
255	242	23,1	62,0	540	500	51,7	76,1
260	247	24,0	62,4	550	509	52,3	77,0
265	252	24,8	62,7	560	517	53,0	77,4
270	256	25,6	63,1	570	526	53,6	77,8
275	261	26,4	63,5	580	535	54,1	78,0
280	266	27,1	63,8	590	543	54,7	78,4
285	271	27,8	64,2	600	552	55,2	78,6
290	275	28,5	64,5	610	560	55,7	78,9
295	280	29,2	64,8	620	569	56,3	79,2
300	285	29,8	65,2	630	577	56,8	79,5
310	294	31,0	65,8	640	586	57,3	79,8
320	304	32,2	66,4	650		57,8	80,0
330	313	33,3	67,0	660		58,3	80,3
340	323	34,4	67,6	670		58,8	80,6
350	332	35,5	68,1	680		59,2	80,8
360	342	36,6	68,7	690		59,7	81,1
370	351	37,7	69,2	700		60,1	81,3
380	361	38,8	69,8	720		61,0	81,8
390	370	39,8	70,3	740		61,8	82,2
400	380	40,8	70,8	760		62,5	82,6
410	390	41,8	71,4	780		63,3	83,0
420	399	42,7	71,8	800		64,0	83,4
430	408	43,6	72,3	820		64,7	83,8
440	418	44,5	72,8	840		65,3	84,1
450	423	45,3	73,3	860		65,9	84,4
460	432	46,1	73,6	880		66,4	84,7
470	442	46,9	74,1	900		67,0	85,0
480	450	47,7	74,5	920		67,5	85,3
490	456	48,4	74,9	940		68,0	85,6