

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

В. І. Скуріхін, Н. В. Гарбуз

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА ТЕХНОЛОГІЯ МАТЕРІАЛІВ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів 2 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 263 – Цивільна безпека)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2018**

УДК 620.22:669.017(042.3)

C46

Скуріхін В. І. Матеріалознавство та технологія матеріалів : конспект лекцій для студентів 2 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 263 – Цивільна безпека / В. І. Скуріхін, Н. В. Гарбуз; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 59 с.

Автори : канд. техн. наук, доц. В. І. Скуріхін,
асист. Н. В. Гарбуз

Конспект лекцій складено з метою допомогти студентам спеціальності «Цивільна безпека» під час підготовки до занять, заліків та іспитів із курсу «Матеріалознавство та технологія матеріалів».

Рецензент

А. В. Коваленко, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 7 від 16 січня 2017 р.

© В. І. Скуріхін, Н. В. Гарбуз, 2018
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ І	
ВИМОГИ ДО МЕТАЛІВ	6
1.1 Кристалічна будова металів.....	6
1.2 Вимоги до металів	10
2 ДІАГРАМА СТАНУ СИСТЕМИ ЗАЛІЗО – ВУГЛЕЦЬ	
ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ, ЛЕГОВАНІ І	
БУДІВЕЛЬНІ СТАЛІ	14
2.1 Металеві сплави.....	14
2.1.1 Діаграми стану сплавів	15
2.1.2 Правило відрізків	17
2.2 Сплави заліза з вуглецем.....	18
2.2.1 Будова і властивості чистого заліза	18
2.2.2 Структурні складові сталі та чавуну.....	20
2.2.3 Діаграма стану сплавів заліза з вуглецем	21
2.3 Вуглецеві, леговані і будівельні сталі	28
3 КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ ТА СПЛАВИ, БУДІВЕЛЬНІ ТА	
СПЕЦІАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ	33
3.1 Кольорові метали та сплави.....	33
3.1.1 Мідь та мідні сплави	33
3.1.2 Алюміній та сплави на його основі	34
3.1.3 Магній та сплави на його основі.....	36
3.1.4 Титан та сплави на його основі.....	37
3.2 Будівельні матеріали та їх основні властивості.....	38
3.2.1 Будівельні матеріали	38
3.2.1.1 Фізичні та хімічні властивості будівельних матеріалів.....	39
3.2.1.2 Механічні властивості будівельних матеріалів.....	40
3.3 Пластичні маси	40
3.3.1 Склад і властивості пластмас	40
3.3.2 Термопластичні пластмаси.....	41
3.4 Гумові матеріали	43
4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ І	
КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ.....	44
4.1 Видобуток руди	44
4.2 Збагачення руди.....	45
4.3 Відновлення металу.....	45
4.3.1 Термохімічне відновлення металу	45
4.3.2 Конвертерний спосіб отримання сталі	46
4.3.3 Мартенівський спосіб отримання сталі	46
4.3.4 Відновлення металу електролізом	46
4.3.5 Фізичне відділення металу	47
4.3.6 Рафінування	47

5 ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ	48
5.1 Відпал.....	49
5.2 Загартування і відпуск сталі	51
5.3 Поверхнєве зміцнення сталі.....	55
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	59

ВСТУП

Мета вивчення дисципліни «Матеріалознавство і технологія матеріалів» – сформувані у майбутніх фахівців знання і вміння, що дозволяють обґрунтовано вибирати матеріали і сучасні методи формоутворення заготовок і деталей.

Основне завдання дисципліни – знати фактори, що визначають властивості матеріалів, методи спрямованої зміни їх властивостей; вивчити конструкційні, інструментальні, і неметалеві будівельні і спеціальні матеріали.

Матеріалознавство – наука про зв'язки між складом, будовою і властивостями матеріалів і закономірності їх змін при зовнішніх фізико-хімічних впливах. Це одна з перших інженерних дисциплін, основи якої широко використовуються при курсовому і дипломному проектуванні, а також у практичній діяльності інженера.

Технологія матеріалів являє собою сукупність сучасних знань про способи виробництва матеріалів і їх переробки з метою виготовлення виробів різного призначення.

Ознайомлення з сучасними способами отримання чорних і кольорових металів, пластичних мас та інших неметалевих матеріалів, знання основних властивостей і методів їх обробки необхідно для правильного підбору і використання цих матеріалів в різних галузях промисловості.

Теоретичною основою матеріалознавства і технології матеріалів є відповідні розділи фізики, хімії, технічної механіки.

1 КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ І ВИМОГИ ДО МЕТАЛІВ

1.1 Кристалічна будова металів

У металів електрони на зовнішніх оболонках мають слабкий зв'язок з ядром, легко відриваються і можуть вільно переміщатися між позитивно зарядженими ядрами. Отже, в металі позитивно заряджені іони оточені «вільними» електронами. Так як ці електрони рухливі аналогічно часткам газу, то використовується термін «електронний газ». Атоми в металах розміщуються закономірно, утворюючи кристалічну решітку [1]. Кристалічна решітка – це подумки проведені в просторі прямі лінії, що з'єднують найближчі атоми, які проходять через їх центри, щодо яких вони здійснюють коливальні рухи (рис. 1.1).

Відстані (a, b, c) між атомами, тобто параметри кристалічної решітки, знаходяться в межах $2 \dots 6 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$).

Тип кристалічної решітки (рис. 1.1) залежить від металу, температури і тиску. Це використовується при термообробці металів для поліпшення їх експлуатаційних властивостей.

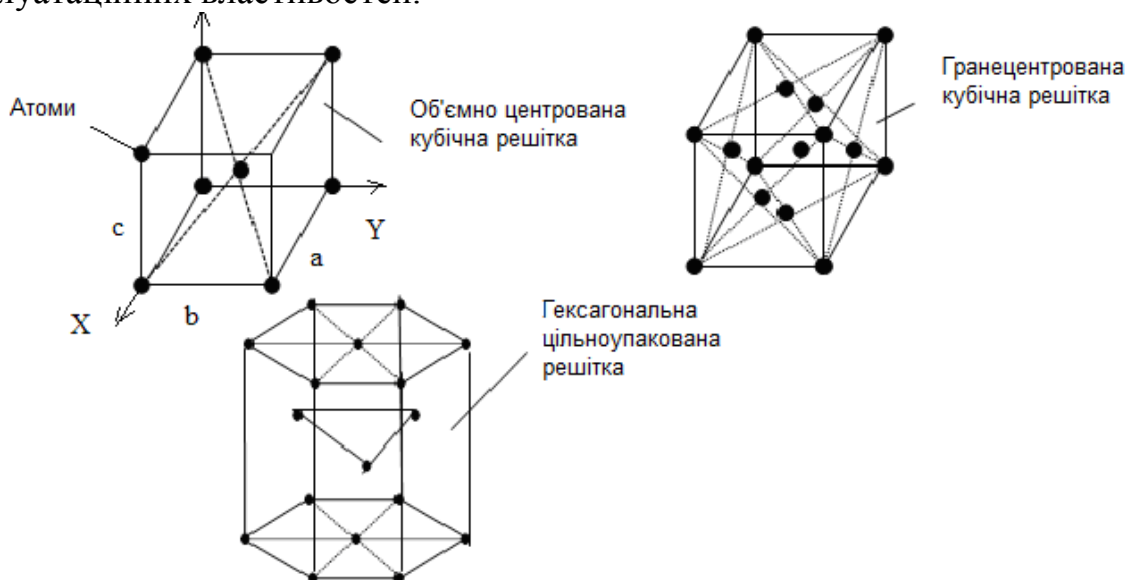


Рисунок 1.1 – Види кристалічних решіток

У кубічній об'ємноцентрованій решітці атоми займають 68% обсягу, а в гранецентрованій – 74 %. В металах міжатомні відстані значно менше, ніж в неметалах, тому метали мають значно більшу щільність і більшу питому вагу. Реальні метали складаються з великої кількості кристалів, різно-орієнтованих в просторі відносно один одного. На межі зерен атоми кристалів не мають правильного розташування. Експериментально встановлено, що внутрішня кристалічна будова зерен не є правильною. У решітках є різні дефекти (недосконалості), які порушують зв'язок між атомами і впливають на механічні властивості металів.

Недосконалості в кристалічних решітках:

1. Точкові (рис. 1.2):

– наявність вакансій, тобто місць в решітці, не зайнятих атомами. Це відбувається через зсув атомів від рівноважного стану. Число вакансій збільшується зі зростанням температури;

– дислоковані атоми, тобто атоми, що вийшли з вузла решітки і зайняли місце в між вузлами.

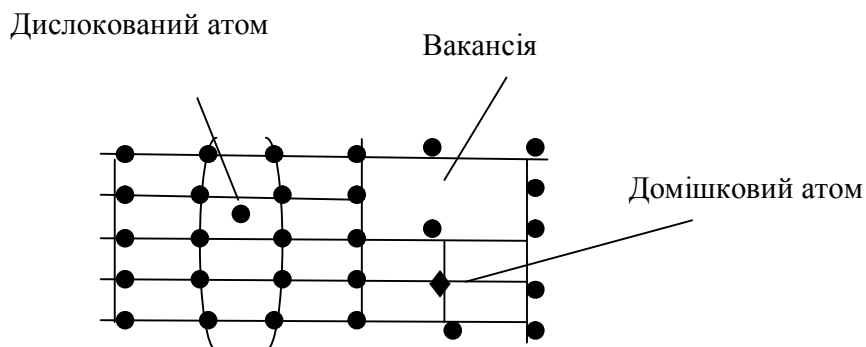


Рисунок 1.2 – Дефекти кристалічної решітки

– домішкові атоми, тобто в основному металі є чужорідні домішки. Наприклад, в чавуні основними атомами є атоми заліза, а домішковими – атоми вуглецю, які або займають місце основного атома, або впроваджуються всередину комірки.

1. Поверхневі недосконалості, що мають невелику товщину при значних розмірах в двох інших напрямках.

2. Лінійні недосконалості (ланцюжки вакансій, дислокацій і т.д.). Лінійні дефекти малі в двох напрямках і значно більшого розміру в третьому.

При нагріванні аморфних тіл (смола, скло, пластмаси) до рідкого стану і охолодженні до твердого стану (рис. 1.3) в їх внутрішній будові якісних змін не відбувається. У твердому стані атоми в аморфному тілі розташовані так само хаотично, як і в рідкому, мають тільки менший ступінь переміщення. Температура плавлення $T_{пл}$ дорівнює температурі кристалізації $T_{кр}$.

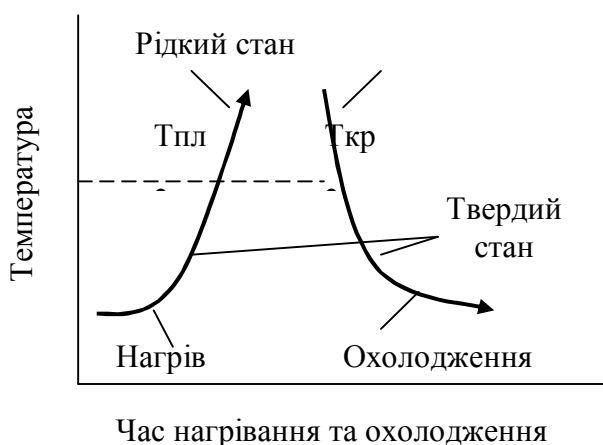


Рисунок 1.3 – Криві нагрівання й охолодження аморфного тіла

Метали поведуться інакше (рис. 1.4). На ділянці 1–2 відбувається нагрів металу; кристалічна решітка зберігається, але атоми збільшують амплітуду коливань за рахунок поглинутої теплової енергії. На горизонтальній ділянці 2–3 також підводиться тепло, але температура $T_{пл}$ не підвищується, тому що тепло, що підводиться, цілком витрачається на руйнування кристалічної решітки. Атоми переходять в неупорядкований стан. Після руйнування останньої ділянки кристалів в точці 3 починається підвищення температури рідкого металу по лінії 3–4.

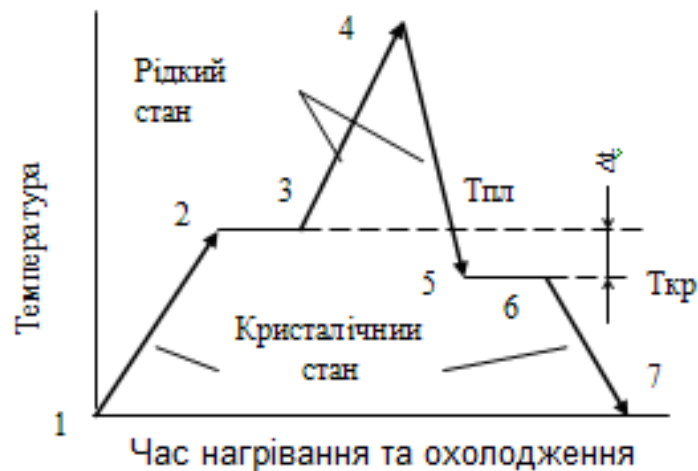


Рисунок 1.4 – Криві нагрівання та охолодження металу

Під час охолодження (4–5) на горизонтальній ділянці 5–6 відбувається кристалізація, при якій виділяється тепло, тому процес проходить при постійній температурі $T_{кр}$. Кристалізація металу відбувається не при температурі плавлення $T_{пл}$, а при деякому переохолодженні Δt , величина якого залежить від природи металу, наявності домішок і швидкості охолодження.

Кристалізація починається з того, що при зниженні температури до значення $T_{кр}$ починають утворюватися дрібні кристалики, які називають центрами кристалізації (зародками). При подальшому зменшенні енергії металу відбувається зростання кристалів і в той же час в рідині виникають нові центри кристалізації, тобто процес кристалізації складається з двох процесів що відбуваються одночасно: зародження нових центрів кристалів і росту кристалів з раніше утворених центрів. Процес кристалізації схематично подано на рисунку 1.5.

На площі, обмеженій квадратами, показані послідовні етапи зародження з атомів первинних центрів кристалізації, їх зростання і виникнення нових зародків, подальшого зростання кристалів до зіткнення їх кордонів (від чого порушується правильна форма кристалів) і закінчення процесу кристалізації. В результаті утворюється структура зерен кристалів з неправильною геометричною формою.

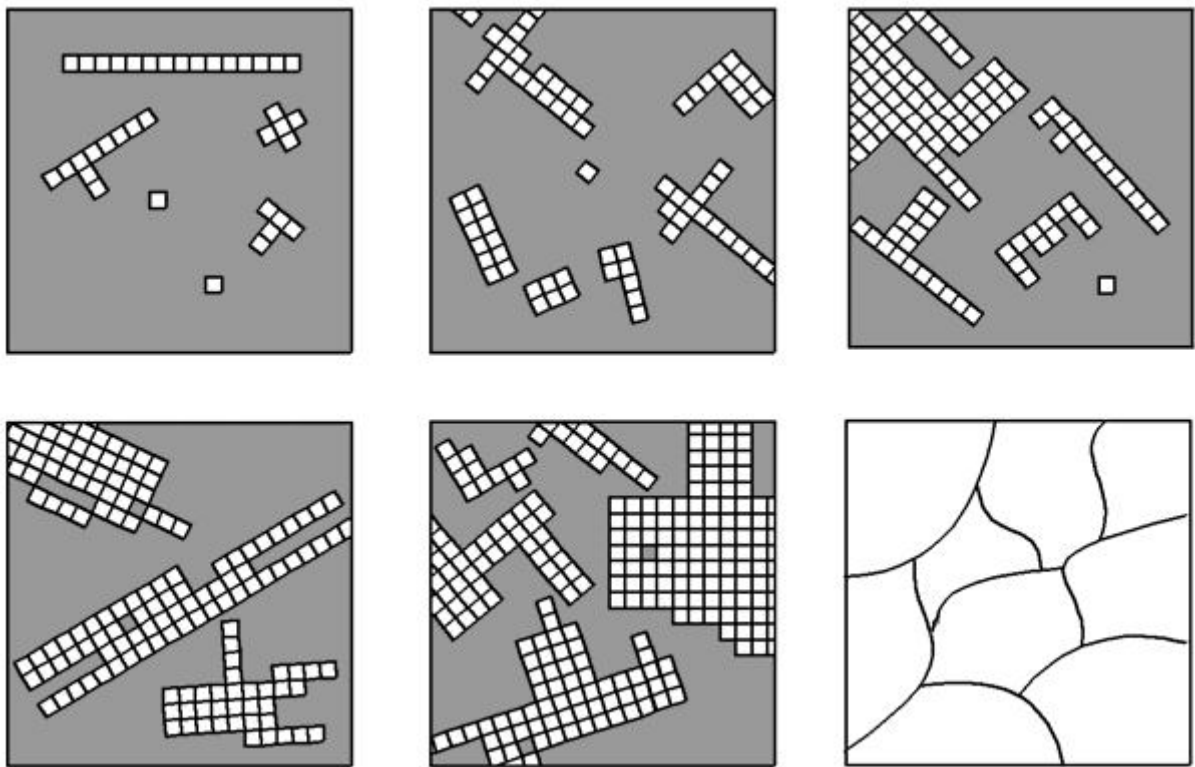


Рисунок 1.5 – Схема процесу кристалізації

При переохолодженні (великих значеннях Δt) утворюється дрібне зерно, тому що кристали швидко утворюються, але повільно ростуть, а при менших значеннях Δt виникає велике зерно. Дрібнокристалічний метал більш твердий і міцний, ніж крупнокристалічний. Отже, підбором температури переохолодження Δt можна регулювати механічні характеристики металу. Багато що залежить від кількості нерозчинних домішок, які є центрами кристалізації. Чим більше цих частинок, тим менше зерна металу.

На практиці для отримання дрібного зерна в рідкий метал вводяться спеціальні речовини – модифікатори, які є додатковими центрами кристалізації. Процес штучного регулювання величини зерен отримав назву модифікування. Модифікатори додають в сплави в кількості від тисячних до десятих часток відсотків [1].

Вплив ступеня переохолодження Δt на процес кристалізації добре видно в структурі зливка (рис. 1.6). Отримана в конверторі або в мартені, сталь (0,5 ... 3 тн.) заливається в виливницю. Між розплавленим металом і атмосферою по висоті і ширині зливка великий перепад температур (понад 1500°C). В результаті на поверхні зливка, тобто там, де є найбільший перепад температур, буде дрібнозерниста структура, а в центрі зливка при мінімальному перепаді температур при кристалізації виникнуть великі, а між ними - стовпчасті кристали.

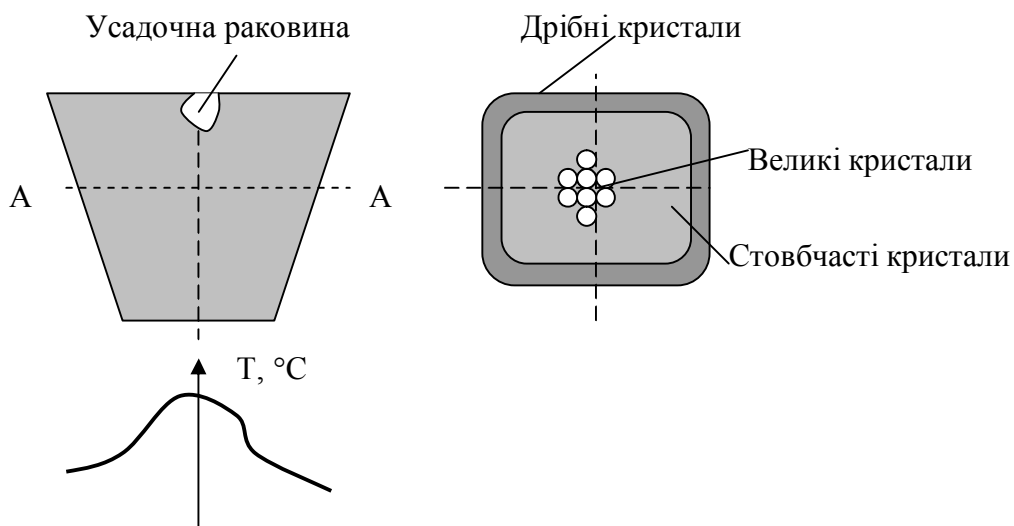


Рисунок 1.6 – Зміна температури T і структури Δt металу по перетину А-А злитка.

1.2 Вимоги до металів

Механічні властивості характеризують здатність матеріалів чинити опір дії зовнішніх сил [1].

До основних механічних властивостей відносяться міцність, твердість, ударна в'язкість, пружність, пластичність, крихкість і ін.

Міцність – здатність матеріалу чинити опір руйнівній дії зовнішніх сил.

Твердість – здатність матеріалу чинити опір впровадженню в нього іншого, більш твердого тіла під дією навантаження.

В'язкість – властивість матеріалу чинити опір руйнуванню під дією динамічних навантажень.

Пружність – властивість матеріалів відновлювати свої розміри і форму після припинення дії навантаження.

Пластичність – здатність матеріалів змінювати свої розміри і форму під дією зовнішніх сил, не руйнуючись при цьому.

Крихкість – властивість матеріалів руйнуватися під дією зовнішніх сил без залишкових деформацій.

Твердість характеризує опір матеріалів до пластичних деформацій. Чим вище твердість, тим більше міцність і менше знос деталі. Особливо велике значення це має для робочих органів будівельних і дорожніх машин, що працюють в умовах абразивного (пісок, щебінь, тощо) зношування.

Твердість металів вимірюється шляхом вдавнення в випробуваний зразок твердого наконечника різної форми.

Існує лінійний зв'язок між твердістю і міцністю матеріалу:

– для сталей і алюмінієвих сплавів – $\sigma_b = 0,35 \text{ HB}$;

– для мідних сплавів – $\sigma_b = 0,45 \text{ HB}$.

Метод Брінелля заснований на вдавлюванні в поверхню металу сталеві загартованої кульки під дією певного навантаження. Після зняття навантаження

в зразку залишається відбиток. Число твердості по Брінеллю HB визначається відношенням навантаження, що діє на кульку, до площі поверхні отриманого відбитка.

Метод Роквелла заснований на вдавлюванні в випробуваний зразок загартованої сталевий кульки діаметром 1,588 мм (шкала В) або алмазного конуса з кутом при вершині 120° (шкали А і С). Вдавлювання проводиться під дією двох навантажень – попереднього, яке дорівнює 100 Н і остаточного рівного 600, 1000, 1500 Н для шкал А, В і С відповідно. Число твердості по Роквеллу HRA, HRB і HRC визначається по різниці глибин вдавнення.

В **методі Віккерса** застосовують вдавлювання алмазної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136° . Число твердості по Віккерсу HV визначається відношенням прикладеного навантаження до площі поверхні відбитка.

Під час **статичного випробування на розтяг** визначають величини, що характеризують міцність, пластичність і пружність матеріалу. Випробування проводяться на циліндричних (чи плоских) зразках з певним співвідношенням між довжиною l_0 і діаметром d_0 (рис 1.7).

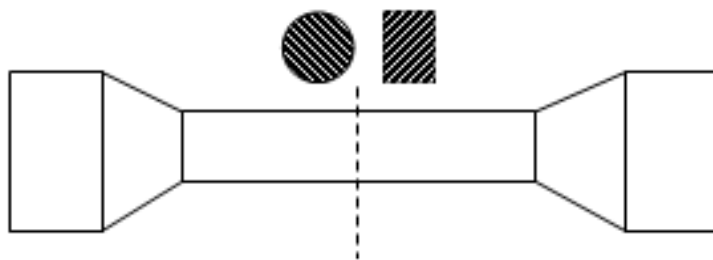


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд зразків (круглого і прямокутного перерізу) для випробування матеріалів на розтяг

Зразок розтягується під дією прикладеної сили P (рис. 1.8 а) до руйнування. Зовнішнє навантаження викликає в зразку напругу і деформацію. Напруга

σ – це відношення сили P до площі поперечного перерізу F_0 , МПа:

$$\sigma = P/F_0. \quad (1.1)$$

Деформація характеризує зміну розмірів зразка під дією навантаження у відсотках:

$$\varepsilon = [(l_1 - l_0)/l_0] \cdot 100, \quad (1.2)$$

де l_1 – довжина розтягнутого зразка;

l_0 – довжина зразка начального розміру.

Деформація може бути пружною (зникає після зняття навантаження) і пластичною (що залишається після зняття навантаження).

При випробуваннях будується діаграма розтягування, що представляє собою залежність напруги від деформації. На рисунку 1.9, б наведена діаграма для низьковуглецевої сталі. Після проведення випробувань визначаються наступні характеристики механічних властивостей.

Межа пружності σ_y – це максимальне напруження, при якому в зразку не виникають пластичні деформації.

Межа плинності σ_T – це напруга, відповідна майданчику плинності. Якщо на діаграмі немає майданчика плинності (що спостерігається для крихких матеріалів), то визначають умовну межу плинності $\sigma_{0,2}$ – напруга, що спричиняє пластичну деформацію, яка дорівнює 0,2 %.

Межа міцності (або тимчасовий опір) σ_b – це напруга, що відповідає максимальному навантаженню, яке витримує зразок при випробуванні.

Справжнім опором розриву σ_z називають напругу, відповідну відношенню навантаження в момент розриву до площі перетину зразка в місці розриву:

$$\sigma_z = P_z / F_k, \quad (1.3)$$

де F_k – кінцева площа поперечного перерізу зразка.

Відносне подовження після розриву δ – відношення приросту довжини зразка при розтягуванні до початкової довжини l_0 , %:

$$\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100, \quad (1.4)$$

де l_k – довжина зразка після розриву.

Відносним звуженням після розриву ψ називається зменшення площі поперечного перерізу зразка, віднесене до початкового перетину зразка, %:

$$\psi = [(F_0 - F_k) / F_0] \cdot 100, \quad (1.5)$$

де F_k – площа поперечного перерізу зразка в місці розриву. Відносне подовження і відносне звуження характеризують пластичність матеріалу.

Дослідження **структури металів** проводять декількома способами. **Рентгеноструктурним** методом досліджують внутрішню будову кристалічної решітки (фазовий склад, величину зерен і т.д.). При просвічуванні ультразвуком або рентгенівськими променями визначають якість лиття та зварювання за наявністю тріщин, шлакових включень та раковин.

Макроструктура металу (величина зерен, напрямок волокон в деформованих шарах металу, наявність усадочних і газових тріщин, характер зламу деталі) визначається неозброєним оком або при збільшенні (лупа, мікроскоп) до 30 разів. Поверхню спочатку шліфують наждачним папером, а потім проводять глибоке травлення хімічними розчинами.

При **мікроскопічному** дослідженні використовують мікроскопи зі збільшенням в 50 – 2000 разів. Шліфи металу готуються у вигляді циліндриків

(діаметром і висотою по 10 – 15 мм), або у вигляді кубиків 10 мм × 10 мм. Метал шліфують, полірують і труять в слабких розчинах кислот. На поверхні шліфа металу через неоднакову ступінь травлення структурних складових, зерен і їх меж з'являється мікрорельєф. Створюється поєднання світла і тіні. Більш протравлена структура буде темнішою в мікроскопі в порівнянні з менш протравленою.

Технологічні випробування – це найпростіші види випробування матеріалів на пластичність і руйнування, на можливість кування, згинання, зварювання та ін. Так, випробуванням **на видавлювання** визначається здатність листового матеріалу піддаватися холодному штампуванню. Пуансоном (кулькою) видавлюються лунки до появи першої тріщини. Глибина лунки до руйнування характеризує пластичність матеріалу.

Випробуванням **на вигин** листового матеріалу в холодному і гарячому стані визначається його здатність приймати задану форму. Випробуванням на вигин оцінюється якість зварних швів. Характеристикою міцності є кут прогину до руйнування зварного шва. Проба **на подвійний покрівельний замок** проводиться для листового металу товщиною менше 0,8 мм. Оцінюється кут загину, число загинів і розгинів.

Пробі **на перегин** (повторний загин і розгин) оцінюється якість дроту. Проби **на вигин і розплющування** проводяться для труб діаметром менше 115 мм; отвір засипається сухим піском, далі труба гнеться на 90 градусів навколо оправлення.

Випробуванням **на осадження** в холодному стані перевіряються матеріали для виготовлення болтів і заклепок.

Проба **навиванням** дроту на оправлення проводиться для визначення можливості отримання заданого числа витків.

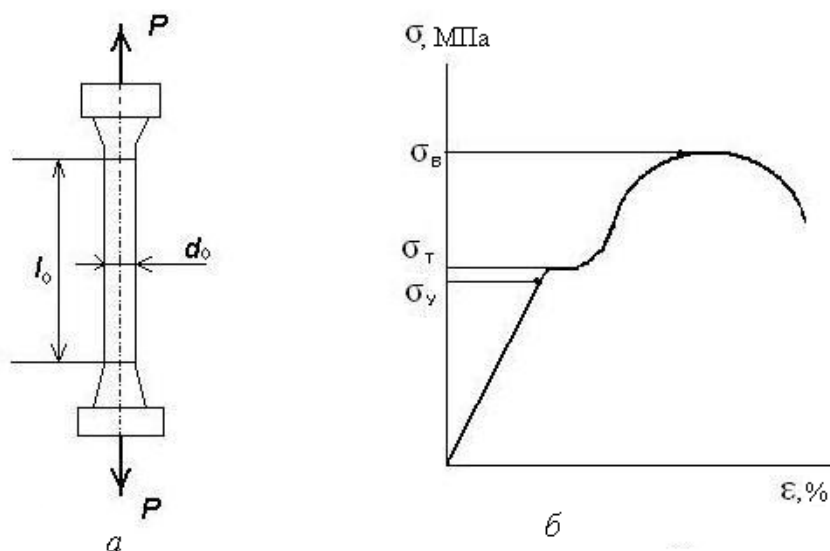


Рисунок 1.8 – Статичні випробування на розтягнення:
а – схема випробування; б – діаграма розтягування.

Контрольні питання

1. Яка найбільш щільно упакована кристалічна решітка металу?
2. Як називається здатність металу утворювати різні типи кристалічних решіток?
3. Як називається нерівномірність властивостей кристала в різних кристалографічних напрямках?
4. Як змінюється концентрація вакансій при підвищенні температури?
5. Які умови тепловідведення сприяють утворенню стовпчастих кристалів?
6. Що сприяє зменшенню розміру зерна при розливанні модифікованого металу?
7. Що таке алотропія або поліморфізм?
8. Що таке дендритна ліквіація?
9. Що таке твердість?
10. Класифікація методів вимірювання твердості?
11. Сутність вимірювання твердості по Брінеллю?
12. До якого значення твердості при випробуванні по Брінеллю використовуються сталеві кульки?
13. Сутність вимірювання твердості по Роквеллу?
14. Чим пояснюється висока пластичність металів?
15. Злам, що виникає при тривалій дії циклічних навантажень?

2 ДІАГРАМА СТАНУ СИСТЕМИ ЗАЛІЗО - ВУГЛЕЦЬ, ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ, ЛЕГОВАНІ І БУДІВЕЛЬНІ СТАЛІ

2.1 Металеві сплави

Металеві сплави – це складні за складом матеріали на основі металів, що зберігають їх основні властивості: високу електро- і теплопровідність, ливарні властивості, ковкість і ін.

До основних понять в теорії сплавів відносяться: система, компонент, фаза [1].

Система – група тіл, виділених для спостереження і вивчення. Метал і металеві сплави є системами.

Чистий метал – проста система. Сплави складаються з двох і більше компонентів і є складними системами.

Компоненти – речовини, що утворюють систему. Компонентами можуть бути метали, неметали і хімічні сполуки.

Фаза – це однорідна частина системи, відокремлена від іншої частини системи (фази) поверхнею розділу, при переході через яку хімічний склад і структура змінюються стрибком.

Наприклад, при кристалізації чистого металу в системі дві фази: рідка

(розплавлений метал) і тверда (зерна затверділого металу).

Таким чином, будова металевого сплаву більш складна, ніж чистого металу, і залежить в основному від того, в які взаємодії вступають компоненти, що становлять цей сплав.

Якщо в твердому стані компоненти хімічно не взаємодіють, то будова сплаву є механічною сумішшю окремих частинок, зерен обох компонентів. Механічна суміш двох (або більше) видів кристалів, що одночасно кристалізувалися з рідини, називається евтектикою, а механічна суміш, утворена з твердої фази, – евтектоїд. Структура сплаву, що складається з механічної суміші, під мікроскопом являє зерна, що складаються з компонентів, що утворюють суміш (рис. 2.1,а). Рентгенограма сплаву покаже наявність двох решіток компонентів K_1 і K_2 .

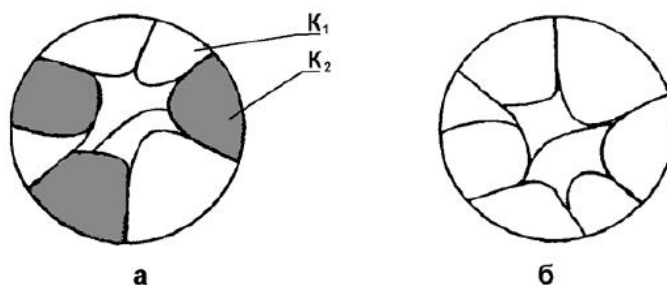


Рисунок 2.1– Вид механічної суміші (а) і твердого розчину (б) під мікроскопом

Якщо складові компоненти сплаву здатні до взаємного розчинення, то утворюються **тверді розчини**. У таких сплавах атоми розчинного елементу розміщені в кристалічній решітці розчинника. На мікрошліфі твердого розчину кристали під мікроскопом виглядають абсолютно однаково (рис. 2.1,б). У кристалах твердого розчину існує тільки один тип кристалічної решітки. Розчинником є той елемент, кристалічну решітку якого має твердий розчин.

Сплави твердих розчинів, як правило, мають знижену твердість і високу пластичність на відміну від механічних сумішей, які мають більш високу твердість і меншу пластичність.

Якщо компоненти сплаву вступають в хімічну взаємодію, то утворюються **хімічні сполуки**. **Хімічні сполуки мають високу твердість і низьку пластичність.** Характерна відмінність хімічної сполуки металів від твердих розчинів полягає в тому, що твердий розчин має кристалічну решітку розчинника, а хімічна сполука - свою кристалічну решітку, відмінну від решіток компонентів.

2.1.1 Діаграми стану сплавів

При дослідженні будови сплавів, при виборі режимів термічної обробки, режимів обробки тиском в гарячому стані, температури розливання рідких сплавів в форми і т.д. широко використовують діаграми стану сплавів.

Діаграма стану представляє графічне зображення будови сплавів в

залежності від температури і хімічного складу. Діаграми стану можуть бути побудовані для сплавів, що складаються з двох, трьох і більше компонентів.

На рисунку 2.2 зображена діаграма стану сплавів двох металів при відсутності взаємної розчинності. По осі ординат відкладається температура. Вісь ординат відповідає чистому металу (А або В).

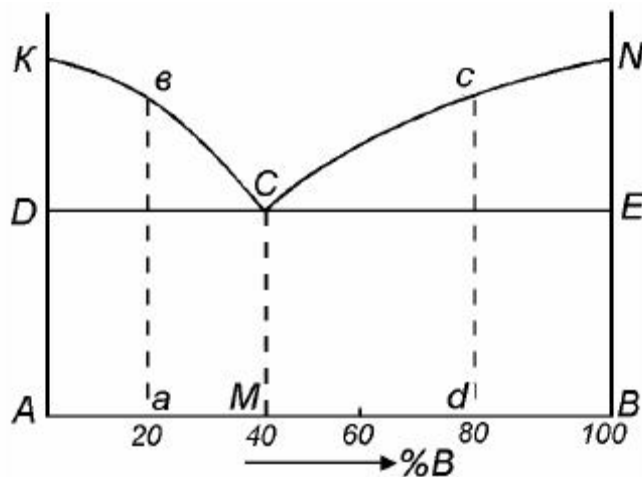


Рисунок 2.2 – Діаграма стану сплаву двох металів за відсутності взаємної розчинності (механічні суміші)

По осі абсцис відкладається концентрація. Загальний вміст обох компонентів в сплаві 100% і кожна точка на осі абсцис відповідає певному змісту кожного компонента. Наприклад, точка «а» відповідає 20% компонента В і 80% компонента А. Кожна вертикаль (АВ і DC), проведена через точку на горизонтальній осі, відповідає зміні температури певного сплаву. Кожна точка на діаграмі стану визначає стан сплаву заданого хімічного складу при даній температурі. Лінія KCN називається лінією **ліквідус**. Сплав вище цієї лінії знаходиться в рідкому стані, а сама лінія відповідає початку кристалізації..

Лінія DCE, що відповідає кінцю кристалізації, називається лінією **солідус**.

В області, обмеженій лініями KC, CD, DK, сплав знаходиться в двофазному стані - рідка фаза і кристали А. В області, обмеженій лініями CN, NE і CC – рідка фаза і кристали В.

У точці С рідка фаза кристалізується в тверду механічну суміш, **евтектику**, що складається з кристалів А і В.

Евтектика завжди має певний хімічний склад. Температура плавлення її нижче температури плавлення компонентів (А і В).

Нижче лінії солідус сплав знаходиться в твердому стані і складається з (А + Е) лівіше СМ і з (В + Е) правіше СМ.

На рис. 2.3 показана діаграма стану при необмеженій розчинності в рідкому і твердому станах. DNC – лінія ліквідус, DMC – лінія солідус.

Між ліквідусом і солідусом сплав складається з рідкої фази і твердого розчину (α). Нижче лінії солідус – твердий розчин α .

сплаву, проводять горизонтальну лінію до перетину з основними лініями, що обмежують дану область; проекції точок перетину на вісь концентрації показують склад фаз.

Для визначення кількості кожної фази (друге положення правила відрізків) через задану точку проводять горизонтальну лінію. Відрізки цієї лінії між заданою точкою і точками, що визначають склади фаз, обернено-пропорційні кількості цих фаз.

Таким чином, якщо точка *a* визначає стан сплаву, точка *b* – склад рідкої фази, а точка *d* – склад твердої фази, то відрізок *bd* визначає всю кількість сплаву. Тоді відрізок *ad* визначає кількість рідкої фази, а відрізок *ba* – кількість твердої фази.

Контрольні питання

1. Визначення понять система, компонент, фаза?
2. Що таке структура?
3. Що таке металевий сплав?
4. Кількість фаз, що знаходяться в рівновазі при первинній кристалізації двокомпонентного сплаву неевтектичного складу?
5. Правило, що визначає склад фаз в діаграмах стану подвійних систем?
6. Кількість фаз, що знаходяться у рівновазі при евтектичному перетворенні в двокомпонентній системі?
9. Правило, що визначає кількісне співвідношення фаз в сплаві?
10. Який сплав володіє кращими ливарними властивостями?

2.2 Сплави заліза з вуглецем

2.2.1 Будова і властивості чистого заліза

Чисте залізо плавиться при температурі 1539°C. Залізо має дуже важливу особливість – зазнавати перетворення в твердому стані (алотропічне перетворення).

Якщо залізо нагріти до повного розплавлення і повільно охолоджувати, отримаємо криву охолодження (рис. 2.4), з якої видно, що воно може перебувати в різних структурних станах, тобто проходити через ряд алотропічних перетворень.

Залізо нижче температури 911°C має кубічну об'ємноцентровану кристалічну решітку (ОЦК) і називається α Fe. Таку ж будову можуть мати деякі інші метали (Ti, V, W, Mo, Cr, Mn).

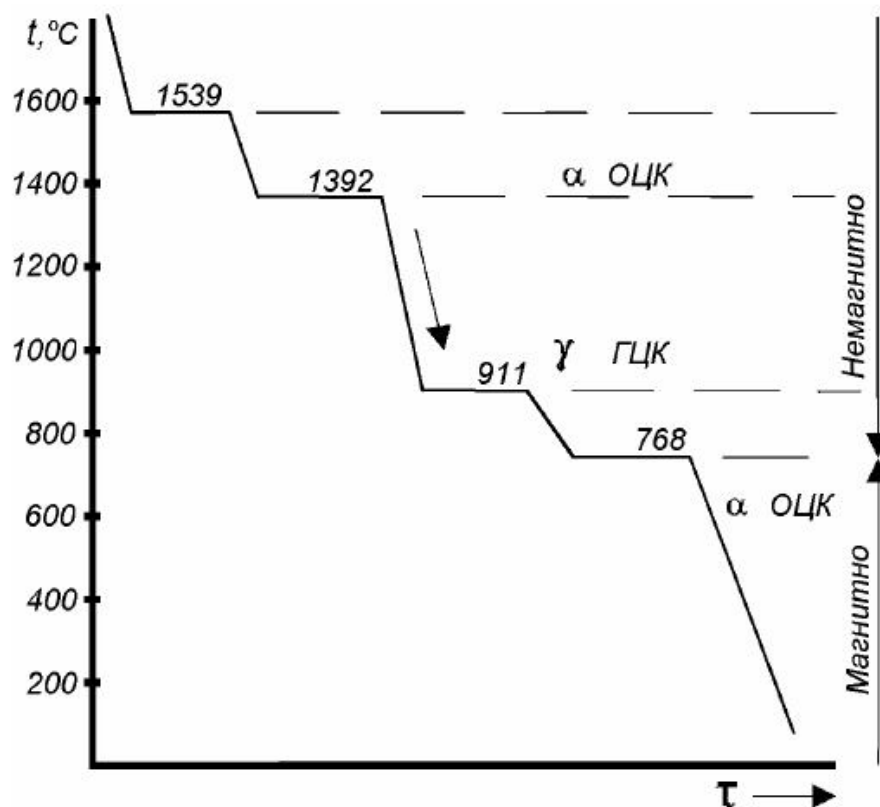


Рисунок 2.4 – Крива охолодження чистого заліза

При температурах 911-1390 °C залізо має кубічну гранецентровану кристалічну решітку (ГЦК) і називається γFe . Така ж решітка є у деяких інших металів (Cu, Al, Pb).

При температурі 1400 °C знову відбувається перегрупування атомів заліза, і знову утворюється кристалічна решітка центрованого куба, яка зберігається аж до температури плавлення заліза +1539 °C. Залізо з кристалічною решіткою центрованого куба, існуюче при температурі вище 1400 °C, називається δ – залізо, або високотемпературне α – залізо. На відміну від α – і γ – заліза δ – залізо не впливає на термічну обробку сталі, так як температура нагріву сталі під час термічної обробки значно нижче 1400 °C [2].

При звичайній кімнатній температурі α залізо має магнітні властивості, які зберігаються і при нагріванні до температури 768 °C. Залізо, нагріте вище зазначеної температури, втрачає свої магнітні властивості.

Більшість видів термічної обробки сталей засновані на модифікаціях α – та γ – заліза.

Ознаки алотропічного перетворення наступні:

1. Змінюється тип кристалічної решітки.
2. Спостерігається тепловий ефект.
3. Властивості змінюються стрибком.

Зі зміною типу кристалічної решітки заліза різко змінюється розчинність в ньому вуглецю. Так максимальна розчинність вуглецю в αFe 0,02 % (при $t = 7230$), а в γFe 2,14% (при $t = 11\ 300$). Це надзвичайно важливо для розуміння процесів, що відбуваються при термічній обробці сталі.

Різну розчинність вуглецю в α – і γ – залізі можна пояснити таким [3]:

1) у кристалічній решітці α – заліза атоми заліза розташовуються таким чином, що проміжки між ними дуже малі і атоми вуглецю не можуть проникнути в ці проміжки;

2) у кристалічній решітці γ – заліза атоми розташовані щільніше, але між деякими з них проміжки збільшені, а через них атоми вуглецю проникають в кристалічну решітку заліза.

2.2.2 Структурні складові сталі та чавуну

Сталь і чавун є сплавами заліза з вуглецем. Кількість вуглецю в сталі і чавуні впливає на якісні характеристики цих сплавів.

Сплав заліза з вуглецем, вміст якого не перевищує 2,14 %, називається сталлю. Вуглець є основним компонентом вуглецевих сталей. Від кількості вуглецю залежить міцність, твердість і пластичність сталі. Крім заліза і вуглецю до складу сталі входять в різних кількостях кремній, марганець, сірка і фосфор. Ці домішки зазвичай потрапляють в сталь в процесі виплавки [4].

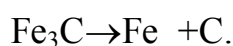
Чавун – це теж сплав заліза з вуглецем. Відмінність чавуну від сталі полягає перш за все в більш високому вмісті в чавуні вуглецю. Чавуном називають сплави заліза з вуглецем, що містять більше 2,14 % вуглецю. До складу чавуну входять також домішки (кремній, марганець, сірка і фосфор), але в більших кількостях. Вуглець в чавуні може знаходитися або в хімічній сполуці із залізом, або у вільному стані у вигляді графіту.

Чавуни, у яких весь вуглець знаходиться в хімічній сполуці із залізом, називають білими (по виду зламу). Чавуни, у яких весь вуглець або більша його частина знаходиться у вигляді графіту, називають сірими.

Властивості сталі і чавуну визначаються властивостями структурних складових – фериту, цементиту, аустеніту, ледебуриту.

Ферит – твердий розчин невеликої кількості вуглецю (до 0,04 %) і інших домішок в α -залізі. Ферит – м'яка, пластична і відносно нетривка структурна складова; його відносне подовження $\delta = 30$ %; твердість HB50 – 80, межа міцності $\sigma_b = 294$ Па. Механічні властивості фериту в великій мірі залежать від величини зерен. Ферит має магнітні властивості (до температури 768 °C).

Цементит (карбід заліза Fe_3C) – хімічна сполука заліза (93,33 %) і вуглецю (6,67 %). Цементит має високу стійкість та значну крихкість, погано проводить електричний струм і тепло. Цементна сітка є світлою на мікроструктурах сплаву. Цементит є нестійкою хімічною сполукою і при високих температурах відбувається його розпад на залізо і вуглець:



Його твердість HB800, тобто він в десять разів твердіше фериту. Цементит слабо магнітний, а при температурі вище 215 °C немагнітний.

Перліт – механічна суміш (евтектоїд), що складається з тонких пластинок або зерен цементиту і фериту, утворюється в результаті розпаду аустеніту при

температурах нижче 727 °С. Вуглецю в перліті 0,8 %.

Таку назву ця суміш одержала тому, що шліф її при травленні має перламутровий відлив. Перліт має два різновиди. Якщо цементит в перліті розташований у вигляді пластинок, то він називається **пластинчастим**, а у вигляді зерен – **зернистим**.

Аустеніт є твердим розчином вуглецю (до 2 %) і інших домішок в γ – залізі. Здатність вуглецю розчинятися в залозі неоднакова при різних температурах. При температурі 1130°С і вище в кристалічній решітці γ – заліза може розчинитися максимальна кількість вуглецю (2%). При температурі нижчій 1130 °С розчинність вуглецю в γ – залізі поступово зменшується, а надлишковий вуглець виділяється у вигляді цементиту. При температурі 723 °С залізо може розчиняти не більше 0,8 % вуглецю. При цій температурі відбувається розпад аустеніту з утворенням перліту. Лише в деяких сталях, що містять велику кількість нікелю або марганцю, можна зберегти структуру аустеніту і при температурах нижче 723 °С аж до кімнатної температури.

У білих чавунах завжди є ще одна структурна складова, яку називають ледебуритом. **Ледебурит** – це механічна суміш (Евтектика), що складається з аустеніту і цементиту і містить 4,3 % вуглецю, утворюється при температурах нижче 1147 °С, має високу твердість і крихкість.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновки:

1) при кімнатній температурі залізовуглецеві сплави завжди складаються з двох структурних елементів - м'якого пластинчастого фериту і твердого цементиту, що зміцнює сплав;

2) структурні складові в залізовуглецевих сплавах можуть поєднуватися або у вигляді механічної суміші, або у вільному стані.

2.2.3 Діаграма стану сплавів заліза з вуглецем

Діаграма стану сплавів заліза з вуглецем (рис. 2.5) дозволяє більш детально ознайомитися зі структурою залізовуглецевих сплавів і перетвореннями, які відбуваються з ними в залежності від складу і температури. Основи діаграми стану сплавів заліза з вуглецем заклав Д. К. Чернов, який в 1868 р. опублікував ряд робіт, де вперше вказав на структурні перетворення, які відбуваються в залізовуглецевих сплавах при нагріванні і охолодженні.

Діаграма охоплює не всі сплави заліза з вуглецем, а обмежується лише сплавами, що містять до 6,67% вуглецю. Залізовуглецеві сплави, що містять більше 5% вуглецю, не становлять практичного інтересу. Цифра ж 6,67 % взята в якості межі на тій підставі, що при такому вмісті вуглецю утворюється хімічна сполука Fe_3C (цементит). Як відомо, хімічна сполука може розглядатися в сплавах як самостійний компонент і тому слугує природною межею діаграми. Отже, розглянута нами діаграма по суті складається з двох компонентів - заліза і цементиту.

У розглянутій діаграмі допущені два спрощення: не вказана область

існування α – заліза, в зв'язку з чим спрощений лівий верхній кут діаграми, і не вказана різна розчинність вуглецю в α – залізі – спрощений лівий нижній кут діаграми [1]. Крива ACD – лінія ліквідусу. Вона зображує температури, при яких починається затвердіння залізовуглецевих сплавів. Крива AE₁CF – лінія солідусу. Вона показує температури, при яких процес кристалізації закінчується. Лінія AE відноситься до сталі, а лінія ECF – до чавунів. Точка А показує температуру плавлення чистого заліза, а точка D – температуру плавлення цементиту.

Лінія AE відноситься до сталі, а лінія ECF – до чавунів. Точка А показує температуру плавлення чистого заліза, а точка D – температуру плавлення цементиту. Точка E характеризує максимальну кількість вуглецю, який може бути розчинено в залізі в твердому стані. Точка C показує склад евтектики; вона відповідає змісту вуглецю (4,3 %) в сплаві. Температура утворення евтектики 1130 °C. Лінія ECF називається евтектичною, тому що в будь-якій точці цієї лінії відбувається утворення евтектики.

По виду структур, що утворюються при первинній кристалізації, всі залізовуглецеві сплави, представлені на діаграмі, можна розбити на три групи.

До першої групи відносяться сплави, що містять не більше 2% вуглецю, тобто сталі. В процесі їх кристалізації з рідкого сплаву будуть утворюватися кристали твердого розчину вуглецю в γ – залізі, тобто аустеніт. Таким чином, всі сплави цієї групи після закінчення процесу затвердіння будуть складатися з кристалів аустеніту.

До сплавів другої групи відносяться білі чавуни, що містять від 2 до 4,3 % вуглецю. Ці сплави можуть утворювати евтектику, і у таких сплавах на початку кристалізації виділяється той компонент, який знаходиться в надлишку до евтектичного складу.

У розглянутих чавунів в надлишку до евтектики буде залізо. Отже, так само як і у сталі, з рідкого сплаву будуть виділятися кристали аустеніту. Різниця полягає в тому, що при температурі 1130 °C (в кінці процесу кристалізації чавуну) буде утворюватися евтектика – ледебурит. Таким чином, після закінчення процесу кристалізації структура сплавів другої групи буде складатися з аустеніту і ледебуриту.

Дещо інший характер носить процес кристалізації сплавів третьої групи. Так як всі сплави цієї групи містять більше 4,3 % вуглецю, то в надлишку до евтектичного складу буде вуглець. Отже, процес затвердіння сплавів третьої групи почнеться з виділення у вигляді кристалів цементиту надлишкового вуглецю. Коли в рідкому сплаві залишиться 4,3 % вуглецю, затвердіння закінчиться утворенням евтектики – ледебуриту. Всі сплави третьої групи після закінчення процесу кристалізації матимуть структуру цементиту і ледебуриту.

Диаграмма состояний железо-углерод

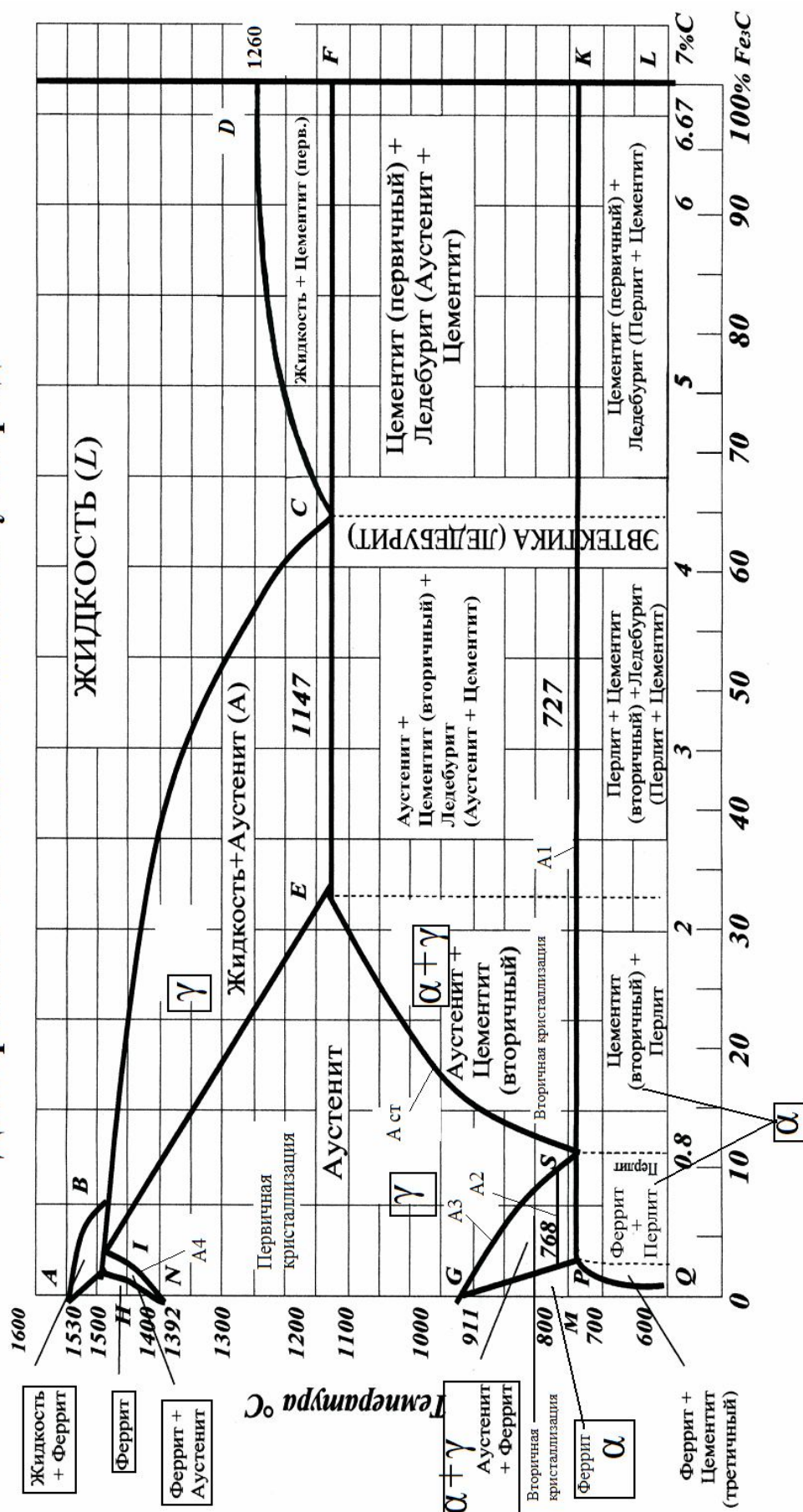


Рисунок 2.5 – Диаграмма стану сплавів залізо-вуглець

Якщо сплав містить 4,3 % вуглецю, тобто має евтектичний склад, то кристалізація буде протікати при постійній температурі. Структура такого сплаву після затвердіння буде складатися з ледебуриту, тобто з механічної суміші цементиту і аустеніту.

Таким чином, в результаті первинної кристалізації сталь отримає структуру аустеніту, яка відрізняється хорошою пластичністю і в'язкістю; тому сталь порівняно добре піддається обробці тиском при високих температурах..

Всі білі чавуни мають в своїй структурі в тій або іншій кількості крихкий і твердий ледебурит. Це виключає можливість їх обробки тиском.

Така докорінна зміна технологічних властивостей сплавів в залежності від вмісту вуглецю є причиною того, що саме 2 % вуглецю є межею, яка ділить залізовуглецеві сплави на дві групи – сталь і чавун.

Первинна структура сталі складається з зерен аустеніту. Вона зберігається до лінії GSE. Зазначена лінія відповідає температурам, при яких починається вторинна кристалізація сталей різного складу.

Лінія PSK показує температуру, при якій завершуються процеси вторинної кристалізації сталей. Для сталей представлених на діаграмі, ця температура дорівнює 727 °С. При температурах, нижче зазначеної, істотних перетворень в будові сталі не відчують. Лінія PSK називається евтектоїдною лінією. Отже, структура, отримана при температурі 727 °С, зберігається при подальшому охолодженні (аж до кімнатної температури). Точка S діаграми відповідає складу евтектоїду - перліту.

У чому сутність структурних перетворень, що протікають у сталі в твердому стані?

Вивчення цих перетворень почнемо з лінії GS. Точка G показує перетворення в чистому залізі. Вона відповідає температурі 910 °С. З попереднього нам відомо, що при цій температурі відбувається перетворення γ – заліза в α – залізо.

У сталей цей процес також відбувається, але маючи в решітці γ – заліза ту чи іншу кількість вуглецю, він протікає при більш низьких температурах, ніж у чистого заліза. Крім того, перетворення γ – заліза в α – залізо у сталей відбувається не при постійній температурі, а в інтервалі температур.

Отже, лінія GS діаграми показує для сталей, що містять до 0,8 % вуглецю, температури, при яких починається перетворення аустеніту в ферит.

Процес вторинної кристалізації сталей розглянемо на прикладі сталі, що містить 0,6 % вуглецю. Ця сталь буде зберігати первинну структуру аустеніту до температури 768 °С. При температурі 768 °С в сталі починається алотропічне перетворення, тобто перехід аустеніту в ферит. Внаслідок незначного вмісту вуглецю в фериті залишок аустеніту буде поступово, в міру виділення фериту, збагачуватися вуглецем. Коли концентрація вуглецю в залишку аустеніту досягне 0,8%, то при температурі 727 °С утворюється перліт.

Таким чином, в інтервалі температур 768-727 °С сталь, що містить 0,6% вуглецю, буде складатися з фериту і аустеніту, а при температурах нижче 727°С – з фериту і перліту (рис. 2.6). Світлі зерна структури – ферит, а темні – перліт.

Ця структура зберігається без значних змін і при подальшому охолодженні аж до кімнатної температури.

Подібні перетворення відбуваються у всіх сталей, що містять вуглецю менш 0,8%, з деякою різницею в температурах початку перетворення аустеніту в ферит.

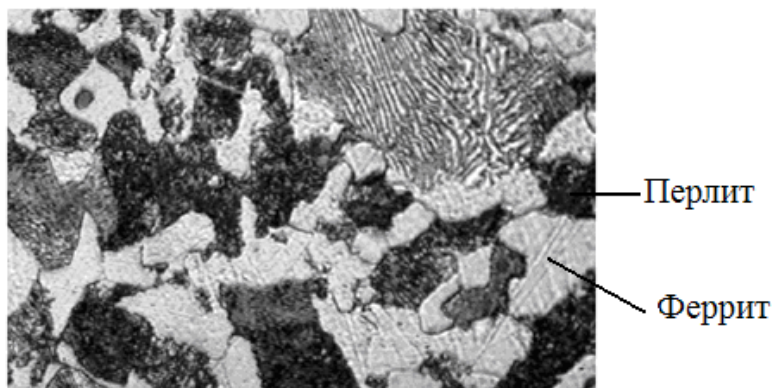


Рисунок 2.6 – Мікроструктура доєвтектоїдної сталі (0,3 % C) $\times 300$

Отже, доєвтектоїдні сталі при кімнатній температурі після повільного охолодження мають одні і ті ж структурні складові: надлишковий ферит + перліт, але в різних кількостях залежно від вмісту вуглецю.

Якщо сталь містить 0,8 % вуглецю, то вторинна кристалізація буде протікати при постійній температурі 727 °C (і супроводжуватися тільки одним процесом - утворенням перліту). Це пояснюється тим, що в даному випадку вміст вуглецю в сталі відповідає евтектоїдному складу.

Таким чином, при повільному охолодженні евтектоїдної сталі формується структура **пластинчастого перліту** (рис. 2.7). Збільшення швидкості охолодження призводить до зниження критичних точок в порівнянні з рівноважною діаграмою – розпад аустеніту відбуватиметься не при температурі 723 °C, а трохи нижче. При цьому швидкість дифузії зменшується, частинки цементиту не встигають вирости, твердість підвищується. Структури з більш дрібними частинками цементиту (у порівнянні з цементитом перліту) називаються **сорбітом** і **троститом**.

Умови утворення продуктів розпаду аустеніту евтектоїдного складу і їх властивості умовно можна представити в наступному вигляді (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Продукти розпаду аустеніту

Швидкість охолодження, °C/с.	Отримана структура	Приблизний розмір частинок цементиту, мм	Твердість, НВ
<50	Перліт	$1 - 9 \cdot 10^{-3}$	<260
50–100	Сорбіт	$1 - 9 \cdot 10^{-4}$	260–300
100–150	Тростит	$1 - 9 \cdot 10^{-5}$	350–400

Таким чином в залежності від швидкості охолодження аустеніт перетворюється в наступні структури:

при охолодженні разом з піччю – **перліт**;
при охолодженні на повітрі – **сорбіт**;
при охолодженні в маслі – **тросит**;

При вивченні мікроструктур сталей часто виникає питання, чому перліт «темний», якщо ферит і цементит – «світлі» фази? Повторимося, перліт – це двофазна структурна складова, а фази, що її утворюють, – це ферит і цементит, що мають різну ступінь травлення. У цьому випадку на поверхні шліфа утворюється складний рельєф, що приводить до розсіювання падаючого світла.

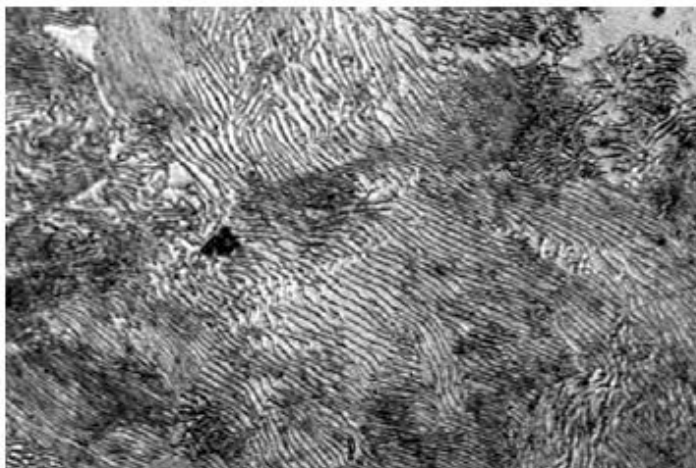


Рисунок 2.7 – Мікроструктура евтектоїдної сталі (0,8 % C) $\times 300$

При кімнатній температурі структурна складова одна – перліт. Перліт має характерну будову зі смужками фериту і цементиту, що чергуються, причому в кожному зерні перліту орієнтування смужок своє, відмінне від такого в сусідньому зерні.

Процес вторинної кристалізації сталі, що містить більше 0,8% вуглецю, представлений на діаграмі лініями ES і SK. Точка E показує максимальну кількість вуглецю, яка розчинена в аустеніті. Лінія ES характеризує граничну розчинність вуглецю в аустеніті при різних температурах. Точка S показує кількість вуглецю, який може бути розчинено в аустеніті при температурі 727°C. На лінії SK закінчується вторинна кристалізація сталей, що містять більше 0,8 % вуглецю, з утворенням перліту (в результаті розпаду аустеніту).

На прикладі сталі, що містить 1,2 % вуглецю, розглянемо більш докладно процеси вторинної кристалізації сталей цієї групи.

Сталь з такою кількістю вуглецю зберігає первинну структуру аустеніту при охолодженні до температури 870 °C. При більш низькій температурі аустеніт вже не здатний розчинити 1,2 % вуглецю, тому при подальшому охолодженні сплаву з кристалічної решітки аустеніту буде виділятися надлишковий вуглець у вигляді цементиту. Так як цей цементит виділяється в результаті вторинної кристалізації, то його називають вторинним цементитом і позначають Fe_3C_2 .

Внаслідок виділення цементиту вміст вуглецю в залишку аустеніту буде безперервно знижуватися і при температурі 727 °C досягне 0,8 %, При цій температурі відбудеться перетворення аустеніту в перліт. На цьому

закінчується процес вторинної кристалізації.

Таким чином, розглянута сталь в інтервалі температур 870-727 °С має структуру аустеніту і вторинного цементиту, а при температурах нижче 727 °С буде складатися з перліту і вторинного цементиту (рис.2.8).

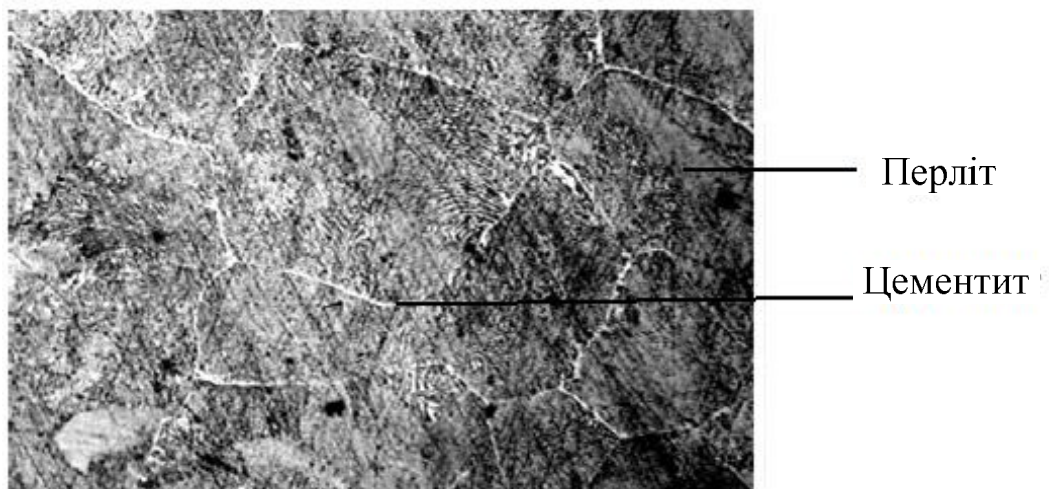


Рисунок 2.8 – Мікроструктура заевтектоїдної сталі (1,2% С) $\times 300$

Тут, поряд з перлітом, присутній вторинний (надлишковий) цементит (біла сітка навколо зерен перліту). При травленні шліфу звичайними реактивами цементит не труїться і так само, як ферит, залишається чисто білим, тому, щоб відрізнити білу сітку цементиту від феритної, потрібні певні навички дослідника або спеціальні методи випробувань.

Аналогічні перетворення в твердому стані будуть зазнавати всі сталі, що містять більше 0,8% вуглецю. Різниця буде лише в температурах початку виділення вторинного цементиту.

Таким чином розрізняють наступні групи сталей в залежності від вмісту в них вуглецю:

- 0–0,02 % вуглецю називають **безперлітними**;
- 0,02–0,8 % вуглецю називають **доевтектоїдними**;
- 0,8 % вуглецю називають **евтектоїдними**;
- вище 0,8 % вуглецю називають **заевтектоїдними**.

1. Розглянуті структурні перетворення, які відбуваються в процесі охолодження залізовуглецевих сплавів, є оборотними, тобто при нагріванні сплаву спостерігаються зворотні явища. Наприклад, якщо при охолодженні аустеніт переходить в перліт, то при нагріванні перліт перетворюється на аустеніт.

2. Діаграма стану залізовуглецевих сплавів показує ті перетворення, які мають місце при досить повільному охолодженні, коли встигають відбутися всі процеси. При швидкому охолодженні сплаву (наприклад, при загартовуванні) структурні перетворення матимуть інший характер.

3. Дані діаграми стану ставляться тільки до звичайних вуглецевих сталей. Для легованих сталей, що містять спеціально введені добавки, вони не можуть бути застосовані.

Контрольні питання

1. Що називають перлітом, цементитом, ледебуритом, аустенітом, феритом?
2. Що таке евтектика та евтектоїд?
3. Чим відрізняються перетворення в твердому стані у доевтектоїдної і заевтектоїдної сталі?
4. Структура сплаву, що містить 0,005 % вуглецю (по масі) при кімнатній температурі?
5. Фазовий склад сплаву, що містить 0,8 % С по масі при температурі 900°C?
6. Фазовий склад сплавів, що містять > 2,14 % С, після завершення первинної кристалізації?
7. Фазовий склад сплаву, що містить 3 % С, при температурі 900 °C?
8. Зміст вуглецю (по масі у відсотках) в сплаві евтектоїдного складу?

2.3 Вуглецеві, леговані і будівельні сталі

За **хімічним** складом сталі поділяються на вуглецеві і леговані. Вуглецевими сталями є сплави заліза Fe з вуглецем С при неминучій наявності домішок інших хімічних елементів.

Леговані сталі це теж сплави заліза Fe з вуглецем С, але з спеціально доданими легуючими елементами (хром, марганець, кремній, титан, ванадій та інші хімічні елементи), що додають сталі необхідні властивості. За **призначенням** вуглецеві сталі діляться на конструкційні та інструментальні.

За **способом виробництва** можуть бути сталі: мартенівські, конверторні, бесемерівські, Томасівські, киснево-конверторні і електросталі [5].

Конструкційні сталі розрізняються за якістю: звичайної якості; якісні вуглецеві; високоякісні.

Зі зростанням цифри в марці сталі звичайної якості групи А збільшуються міцність σ_b і твердість HB, але знижується пластичність δ і ударна в'язкість сталі. Це відбувається за рахунок зміни хімічного складу, в першу чергу вмісту вуглецю [6].

Залежно від ступеня розкислення сталі можуть бути: киплячими (КП), що містять менше 0,05% Si; спокійними (СП), що містять до 0,15 ... 0,3% Si; напівспокійними (НС). За вартістю киплячі сталі (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп, Ст4кп) найдешевші, але мають поріг холодної крихкості на 30 ... 40% вище, ніж сталі спокійні (Ст1сп, Ст2сп, ...). Тому для відповідальних зварних конструкцій, особливо працюючих при низьких температурах в умовах Півночі, використовують спокійні сталі.

З підвищенням вмісту вуглецю зварюваність сталей погіршується, тому сталі Ст5, Ст6 застосовуються для елементів будівельних конструкцій які не піддаються зварюванню.

Сталі групи Б розрізняються за хімічним складом: БСт0, БСт1, БСт2,

БСт3, БСт4, БСт5, БСт6. З ростом цифри в марці сталі збільшується вміст вуглецю, кремнію і марганцю. Природно, що це призводить до збільшення міцності і пластичності і до зниження ударної в'язкості.

Сталі групи В нормуються як за хімічним складом, так і за механічними характеристиками: ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5.

Сталі звичайної якості випускаються у вигляді прокату: швелер, труба, лист, прутки, балка і т.д. Вуглецеві сталі спеціального призначення (мосто - і суднобудування, сільськогосподарського машинобудування) мають додаткові індекси, наприклад, для мостових конструкцій використовується сталь Ст3мост.

М – мартенівська, Б – бесемерівська сталь. Наприклад, мартенівська спокійна сталь: МСт2сп. Спокійні сталі мають більш високі ударні в'язкості і опір динамічного руйнування.

Якісні вуглецеві сталі підрозділяються на дві групи: з нормальним вмістом марганцю (0,5кп, 0,8кп, ... 20, 25, ..., 85.) і з підвищеним (0,7 ... 1,2 % Mn) вмістом марганцю (15Г, 20Г, ..., 70Г) і містять меншу кількість сірки S (до 0,04 %) і фосфору P (до 0,03 %), ніж сталі звичайної якості.

Цифри в марках якісних вуглецевих і легованих сталей означають соті частки% вмісту вуглецю в ній. За вмістом вуглецю в сталі вони діляться на **низьковуглецеві** (до 0,3% C), **середньовуглецеві** (0,3 ... 0,5% C) і **високовуглецеві** (понад 0,5% C).

Низьковуглецеві сталі 0,8кп, 0,5кп використовуються для листового штампування., А сталі 10,15, ... 20,25 – для виготовлення зварних конструкцій.

Середньовуглецеві сталі 30, 35, 40, 45 і 50 застосовуються для виготовлення (з нормалізацією і поверхневим загартовуванням) деталей, схильних до великих навантажень, так, наприклад, із сталей 45, 50 виготовляються колінчаті вали і інші відповідальні деталі. автотракторних двигунів.

Високовуглецеві якісні сталі 55, 60, 65 і 70 використовуються для виготовлення деталей (пружини, ресори, зубчасті колеса і т.д.) з подальшою їх термічною обробкою.

Високоякісні сталі позначаються літерою А в кінці марки: У7А, У8А, ..., У13А, вони містять ще нижчу в порівнянні з якісними сталями кількість сірки S (до 0,02 %) і фосфору P (до 0,03 %).

Інструментальні якісні вуглецеві сталі (У7, У8, ..., У13) використовуються для виготовлення ріжучого (свердло, різець, ...), вимірювального (лінійки, калібри, ...) і штампувального інструменту. Цифра в марці інструментальних сталей показує вміст вуглецю в **десятих** частках відсотка (в інших марках-**соті** частки відсотка)

Вуглецеві сталі мають недостатню міцність, підвищену схильність до старіння і низьку корозійну стійкість, погано прогартовуються, крихкі при низьких температурах і т.д. Тому дуже важливо поліпшити експлуатаційні характеристики сталей, отримати сталі з особливими властивостями, наприклад, жаростійкі, нержавіючі і т.д. Це досягається зміною хімічного складу сталі.

Сталь називається легованою, якщо в неї вводяться спеціальні (легуючі) елементи, що змінюють її властивості (табл. 2.2), або в ній є більш 1 % Si, або Mn. Ці легуючі елементи в буквенному вигляді включаються в марки сталей:

В - вольфрам,	Д - мідь,	А - азот,
Ф - ванадій,	Н - нікель,	Ю - алюміній,
К - кобальт,	Т - титан,	Б - ніобій,
С - кремній,	Х - хром,	Е - селен,
М - молібден,	Р - бор,	Ц - цирконій
Г - марганець,	П - фосфор,	

За хімічним складом леговані сталі можуть бути:

- низьколегованими (сумарна кількість легуючих елементів до 2,5 %);
- середньо-легованими (2,5 ... 10 % легуючих елементів);
- високолегованими (> 10 % легуючих елементів).

Сталь може бути легована тільки одним елементом: хромиста (Cr), нікелева (Ni), ванадієва (V); двома, трьома і більше елементами, наприклад, хромонікелеванадієва сталь 18Х2Н4В. Марка цієї сталі розшифровується так: середньо-легованих (2 % хрому + 4 % нікелю + 1 % ванадію = 7 % легуючих елементів) хромонікелеванадієва сталь, що містить 0,18% вуглецю, 2 % хрому, 4 % нікелю і 1 % вольфраму.

Таблиця 2.2 – Вплив легуючих елементів на властивості сталей.

Характеристики	Вплив легуючих елементів							
	C	Cr	Ni	Mn	Si	W	V	Cu
Міцність на розрив, σ_b	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Межа плинності, σ_T	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Відносне подовження, δ	↓↓	0	0	↓	↓	↓	↓	0
Твердість	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0
Ударна в'язкість, α_n	↓	↑	↑	↓	↓↓	↓	0	0
Втомна міцність	↑	0	0	0	0	0	↑↑	0
Зварюваність	↓	0	0	0	↓	0	↑	↓
Корозійна стійкість	0	↑	↑	↑	↓	0	↑	↑↑

*Умовні позначення: ↑ – підвищує; ↑↑ – значно підвищує;
0 – не впливає; ↓ – знижує; ↓↓ – значно знижує.

Марка сталі 40 ХН4А розшифровується як високоякісна (індекс А в кінці позначення), середньо-легована (1% хрому + 4 % нікелю = 5 % легуючих елементів) хромонікелева сталь, що містить 0,4 % вуглецю, 1 % хрому і 4 % нікелю.

Хімічні елементи можуть утворювати з залізом хімічні сполуки і тверді розчини заміщення.

Елементи першої групи – аустенітоутворюючі (Ni, Mn, C, N, Cu, Cd), розширюють γ область діаграми залізо-вуглець, підвищуючи точку А4 і знижуючи А3. Легуючі елементи 1 - ї групи покращують загартування. Легований аустеніт збільшує міцність сталі не тільки при кімнатних, але і при підвищених температурах, покращує її корозійну стійкість.

Елементи другої групи - феритоутворюючі (Al, Si, W, Ti, Mo, Cr) звужують γ область і розширюють δ область. Вони знижують точку А4 і підвищують точку А3. Легуючі елементи 2 - ї групи розчиняються в фериті, змінюють його властивості і, отже, властивості сталі в цілому.

Леговані сталі підрозділяються на конструкційні, інструментальні і зі спеціальними хімічними властивостями (жаростійкі, нержавіючі і т.д.)

Низьколеговані конструкційні сталі широко використовуються в будівництві та машинобудуванні. Це такі сталі.

Марганцевисті сталі (15Г, 20Г, ..., 30Г, 40Г і ін.) Містять 0,7 ... 1,8 % марганцю, який утворює з феритом і аустенітом твердий розчин, а з вуглецем карбіди.

Крем'янисті сталі (50С2, 55С2, 60С2, 70С3А) містять кремнію 1,5 ... 8 %. З них виготовляються ресори і пружини.

Хромисті конструкційні сталі (15Х, 20Х, ..., 50Х), містять близько 1% хрому. У них поліпшується гарт, але пластичність після гарту майже не знижується, а твердість збільшується.

Хром-молібденова сталь 35ХМА використовується для виготовлення високонавантажених болтів, шпильок, валів, шестерень. Вона добре зварюється.

Застосування низьколегованих будівельних сталей (10ХСНД, 15ХСНД, 16ГС, 16Г2СД, 09Г2, 14Г2 та ін.) дозволяє знизити вагу будівельних конструкцій, підвищити корозійну стійкість, знизити чутливість до низьких температур і до старіння.

Гарячекатаний прокат (листовий, швелери, двотаври, сталь кутову,) з вуглецевих і низьколегованих сталей, призначений для виготовлення зварних будівельних конструкцій, незалежно від його хімічного складу (марки стали), а беручи до уваги тільки механічні властивості (межа плинності σ_T), підрозділяють на умовні класи будівельних сталей.

Нержавіючі сталі містять 0,1 ... 0,45 % С, 12 ... 14 % Cr. Окис хрому захищає виріб від руйнування в агресивному середовищі. Високу корозійну стійкість мають і хромонікелеві сплави (0,12 ... 0,14% С; 17 ... 20 % Cr; 8 ... 11 % Ni).

Зносостійкі сталі – це марганцевисті сталі, містять 0,9 ... 1,1 % С і 12 ... 14 % Mn, з них виготовляються робочі органи екскаваторів, драг і т. д.

Легуючі домішки вводять в сталь при її виробництві в вигляді феросплавів: феросиліцію, феромарганцю і ферохрому. Феросплави отримують в доменних печах, але частіше їх виробляють з руди або рудного концентрату методом відновлення в електропечах.

З багатьох легуючих елементів особливе місце займає по ефективності

ванадій, причому він набагато дешевше багатьох інших легуючих елементів. Сталі, зміцнені з'єднанням ванадію з азотом, добре працюють при низьких температурах в умовах Крайньої Півночі.

Ванадієві (всього 0,06 ... 0,12% ванадію) сталі лише на 3 ... 10% дорожче звичайних вуглецевих сталей, але в ряді випадків термін служби виробів підвищується вдвічі, істотно знижується вага вузлів і машин в цілому. Так кранові колеса і шестерні, виготовлені з ванадієвого сплаву, довговічніше звичайних в 1,5 ... 2 рази. Опорні катки гусеничних тракторів, виготовлені з ванадієвої сталі, стають довговічніше на 30%.

Є 7 класів **арматурної сталі**: А -І - круглого профілю; А -ІІ ... А - VI - періодичного профілю (для підвищеного зчеплення з бетоном).

Основною характеристикою для арматурних сталей є межа плинності σ_t , тому що в разі її перевищення порушується зчеплення бетону з арматурним стрижнем і з'являються тріщини в бетоні.

Контрольні питання

1. Компоненти вуглецевих сталей?
2. Як поділяються вуглецеві сталі за якістю?
3. Що означає цифра в марці сталі 3?
4. Що означає цифра в марці сталі 30?
5. За яким критерієм сталі ділять: на сталі звичайної якості, якісні і високоякісні?
6. Шкідливе явище, яке розвивається через підвищений вміст домішок сірки фосфору і водню в сталі?
7. Як маркуються конструкційні та інструментальні вуглецеві сталі?
8. Поняття легована сталь?
9. Поняття легуючий елемент?
10. Який сумарний вміст легуючих елементів мають низьколеговані сталі?
11. Який сумарний вміст легуючих елементів мають середньо-леговані сталі?
12. Який сумарний вміст легуючих елементів мають високолеговані сталі?
13. Основний хімічний елемент, застосовуваний для легування корозійностійких сталей?
14. Яким основним хімічним елементом легують швидкоріжучі сталі?

3 КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ ТА СПЛАВИ, БУДІВЕЛЬНІ ТА СПЕЦІАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

3.1 Кольорові метали та сплави

3.1.1 Мідь та мідні сплави

Мідь – метал червоного, в зламі рожевого кольору. Температура плавлення 1083 °С. Кристалічна решітка ГЦК. Щільність міді 8.94г / см³ [1,6].

Технічно чиста мідь має високу пластичність і корозійну стійкість, високу електропровідність і теплопровідність. За чистотою мідь підрозділяють на марки:

Марка МВЧк, М00, М0, М1, М2, М03.

Після позначення марки вказують спосіб виготовлення міді: к – катодний, б – безкисневий, р – розкислення. Мідь вогневого рафінування не позначається.

М00к - технічно чиста катодна мідь, що містить не менше 99,99% міді і срібла.

М03 - технічно чиста мідь вогневого рафінування, містить не менше 99,5% міді.

Мідь легко обробляється тиском, але погано різанням і має невисокі ливарні властивості через велику усадку. Тому напівфабрикати міді - прокат (сортамент), листи (широко застосовується мідна фольга), труби (мідні трубки в гідравлічних системах), дріт (діаметром від декількох міліметрів до декількох мкм).

Завдяки високій електропровідності, мідь застосовується, в основному, для виготовлення дротів для електротехнічної й електронної промисловості.

Вартість чистої міді постійно підвищується, а світові запаси мідної руди, за різними оцінками, виснажаться в найближчі 10 ... 30 років.

Мідні сплави поділяють на **бронзи і латуні** [1,6].

Бронзи – це сплави міді з оловом (4–33% Sn), свинцем (до 30% Pb), алюмінієм (5–11% Al), кремнієм (4–5% Si), сурмою і фосфором, і іншими елементами.

Латуні – сплави міді з цинком (до 50% Zn) і невеликими домішками алюмінію, кремнію, свинцю, нікелю, марганцю.

Мідні сплави, призначені для виготовлення деталей методами лиття, називають ливарними, і сплави, призначені для виготовлення деталей пластичним деформуванням – сплавами, оброблюваними тиском.

Мідні сплави позначають початковою буквою їх назви (Бр або Л), після чого слідує перші літери назв основних елементів, що утворюють сплав, і цифри, що вказують кількість елемента у відсотках. Прийнято наступні позначення компонентів сплавів:

А – алюміній Мц – марганець С – свинець Б – берилій

Мг – магній Ср – срібло З – залізо Мш – миш'як

Су – сурма К – кремній Н – нікель Т – титан

Кд – кадмій О – олово Ф – фосфор Х – хром Ц – цинк

Приклади:

БрА9Мц2Л – бронза, що містить 9% алюмінію, 2% Мп, решта Cu ("Л" вказує, що сплав ливарний);

ЛЦ40Мц3Ж – латунь, що містить 40% Zn, 3% Мп, ~ 1% Fe, решта Cu;

Бр0Ф8,0-0,3 – бронза містить 8% олова і 0,3% фосфору;

ЛАМш77-2-0,05 – латунь що містить 77% Cu, 2% Al, 0,055 миш'яку, інше Zn (в позначенні латуні, призначеної для обробки тиском, перше число вказує на вміст міді).

У нескладних за складом латунях вказують тільки вміст у сплаві міді:

Л96 – латунь що містить 96% Cu і ~ 4% Zn (томпак);

Л63 – латунь що містить 63% Cu і – 37% Zn.

Бронзи відрізняються високою корозійної стійкістю і антифрикційними властивостями. З них виготовляють вкладиші підшипників ковзання, вінці черв'ячних зубчастих коліс і інші деталі.

Високі ливарні властивості деяких бронз дозволяють використовувати їх для виготовлення художніх виробів, пам'яників, дзвонів.

Латуні, застосовуються в основному для виготовлення деталей штампуванням витяжкою, розкочуванням, гнуттям, тобто процесами, що вимагають високої пластичності матеріалу заготовки. З латуні виготовляються гільзи різних боєприпасів.

Висока вартість міді і сплавів на її основі привела в 20 столітті до пошуку матеріалів для їх заміни. В даний час їх успішно замінюють пластиками, композиційними матеріалами

3.1.2 Алюміній та сплави на його основі

Алюміній – метал сріблясто-білого кольору [1,6]. Температура плавлення 650°C. Алюміній має кристалічну ГЦК решітку. Найбільш важливою особливістю алюмінію є низька щільність – 2.7г/см³ проти 7.8г/см³ для заліза і 8.94г/см³ для міді. Алюміній має електричну провідність, що становить 65% електричної провідності міді. Залежно від чистоти розрізняють алюміній особливої чистоти: А999 (99.999% Al); високої чистоти: А995 (99.995% Al), А99, А97, А95 і технічної чистоти: А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99.0% Al).

Технічний алюміній виготовляють у вигляді листів, профілів, прутків, дроту та інших напівфабрикатів і маркують АД0 і АД1.

Алюмінієвий дріт використовується в електротехнічній промисловості в лініях електропередачі, а прокат алюмінію в харчовій промисловості, в якості покрівельного матеріалу і т.д. Чистий алюміній відрізняється високою корозійної стійкістю, але має низьку міцність, що не дозволяє використовувати його в якості конструкційного матеріалу.

Найбільшого поширення набули сплави Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu-Mg та інші.

Всі сплави алюмінію можна розділити на ті, що **деформуються**, призначені для отримання напівфабрикатів (листів, плит, прутків і т.д.), а також **ливкових** і **штампованих заготовок** і **ливарні**, призначені для фасонного лиття.

Сплави алюмінію, володіючи гарною технологічністю на всіх стадіях переробки, малою щільністю, високою корозійною стійкістю, при достатній міцності, пластичності і в'язкості знайшли широке застосування в авіації, суднобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості.

Дюралюмін. Дюралюмінами називаються сплави на основі елементів Al-Cu-Mg, в які додатково вводять марганець. Дюралюмін, який виготовляється в листах, для захисту від корозії піддають плакуванню, тобто покриттю тонким шаром алюмінію високої чистоти.

Зі сплаву Д16 виготовляють обшивки, шпангоути, стрингери і лонжерони літаків, силові каркаси, будівельні конструкції, кузова вантажних автомобілів.

Дюралюміни маркуються буквою "Д" та порядковим номером, наприклад: Д1, Д12, Д18, але іноді і по іншому, наприклад – АК4, АК8.

Дюралюміни можна зміцнювати термообробкою, яка складається з гарту і подальшого старіння. Міцність сплаву при цьому значно підвищується. Наприклад, сплав Д16 – $\sigma_{0.2} = 400 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 540 \text{ МПа}$, $\delta = 11\%$.

Сплави авіаль (АВ). Ці сплави поступаються дюралюмінам по міцності, але мають кращу пластичність в холодному і гарячому станах. Авіаль задовільно обробляється різанням (після загартування і старіння) і зварюється контактним і аргон-дуговим зварюванням. Сплав має високу загальну опірність корозії, але схильний до міжкристалічної.

Високоміцні сплави. Межа міцності цих сплавів досягає 550- 700МПа, але при меншій пластичності, ніж у дюралюміна. Представником високоміцних алюмінієвих сплавів є сплав В95.

При збільшенні вмісту цинку і магнію міцність сплавів підвищується, а їх пластичність і корозійна стійкість знижуються. Домішки марганцю і хрому покращують корозійну стійкість. Сплави мають гарну пластичність в гарячому стані і порівняно легко деформуються в холодному стані після відпалу. Сплав В95 добре обробляється різанням і зварюється точковим зварюванням, його застосовують в літакобудуванні і суднобудуванні для навантажених конструкцій, які працюють тривалий час при $t \leq 100 \div 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Сплав В95 рекомендується для стислих зон конструкцій і для деталей без концентраторів напружень. Сплав В95 – $\sigma_{0.2} = 530\text{-}550 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 560\text{-}600 \text{ МПа}$, $\delta = 8\%$.

Сплави для кування та штампування. Сплави цього типу відрізняються високою пластичністю і задовільними ливарними властивостями, що дозволяють отримати якісні злитки для подальшої обробки тиском.

Сплав АК6 використовують для деталей складної форми і середньої міцності, виготовлення яких вимагає високої пластичності в гарячому стані. Сплав АК8 рекомендують для важко-навантажених штампованих деталей.

Сплав АК8 – $\sigma_{0.2} = 300 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 480 \text{ МПа}$, $\delta = 10\%$.

Жаростійкі сплави. Ці сплави використовують для деталей, що працюють при температурі до 300 °С. Жаростійкі сплави мають більш складний хімічний склад, ніж розглянуті вище алюмінієві сплави. Їх додатково легують залізом, нікелем і титаном.

Сплав Д20 – $\sigma_{0.2} = 250 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 400 \text{ МПа}$, $\delta = 12\%$.

До цих сплавів відносяться сплави алюмінію з марганцем або з магнієм. Сплави легко обробляються тиском, добре зварюються і мають високу корозійну стійкість. Обробка різанням утруднена.

Сплави (АМц, АМг2, АМг3) застосовують для зварних і клепаних елементів конструкцій, що зазнають невеликих навантажень і потребують високого опору корозії.

Сплав АМг3 – $\sigma_B = 220\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 110\text{МПа}$, $\delta = 20\%$.

Сплави для фасонного лиття повинні володіти високою рідко-плинністю, порівняно невеликою усадкою, малою схильністю до утворення гарячих тріщин і пористості в поєднанні з хорошими механічними властивостями, опором корозії і ін.

Сплави Al-Si (силуміни). Відрізняються високими ливарними властивостями, а вилівка - великою щільністю. Сплави Al-Si (АЛ2, АЛ4, АЛ9) порівняно легко обробляються різанням. Сплав АЛ9 – $\sigma_B = 200\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 140\text{МПа}$, $\delta = 5\%$.

Сплави Al-Cu. Ці сплави (АЛ7, АЛ19) після термічної обробки мають високі механічні властивості при нормальній і підвищеній температурах і добре обробляються різанням. Ливарні властивості низькі.

Сплав АЛ7 використовують для відливання невеликих деталей простої форми, сплав схильний до крихкого руйнування. Сплав АЛ7 – $\sigma_B = 240\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 160\text{МПа}$, $\delta = 7\%$.

Сплави Al-Mg. Мають низькі ливарні властивості. Характерною особливістю цих сплавів є гарна корозійна стійкість, підвищені механічні властивості й оброблюваність різанням.

Сплави АЛ8, АЛ27, АЛ13 і АЛ22 призначені для виливків, що працюють у вологій атмосфері, наприклад, в суднобудуванні і авіації.

Сплав АЛ8 – $\sigma_B = 350\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 170\text{МПа}$, $\delta = 10\%$.

Жаростійкі сплави. Найбільше застосування отримав сплав АЛ1, з якого виготовляють поршні, головки циліндрів і інші деталі, що працюють при температурі 275-300 °С. Сплав АЛ1 – $\sigma_B = 260\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 200\text{МПа}$, $\delta = 0,6\%$.

Слід зазначити, що при позначенні алюмінієвих сплавів відсутня суворості система і про склад конкретного сплаву можна судити тільки з залученням спеціальних довідників.

3.1.3 Магній та сплави на його основі

Магній – метал світло-сірого кольору. Характерною властивістю магнію є його мала щільність ($1,74\text{г/см}^3$). Температура плавлення магнію 650 °С. Кристалічна решітка гексагональна. Технічний магній випускають трьох марок МГ90, МГ95 і МГ96. Механічні властивості литого магнію: $\sigma_B = 115\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 25\text{МПа}$, $\delta = 8\%$, 30НВ. При підвищенні температури магній інтенсивно окислюється і навіть займається. Використовується магній в піротехніці і хімічній промисловості [1,6].

Чистий магній має малу міцність і пластичність, тому як конструкційний матеріал не використовується. Для поліпшення властивостей в

магнієві сплави вводять алюміній, цинк, марганець та інші легуючі домішки.

Магнієві сплави поділяють на ті, що деформуються (ГОСТ 14957-76) та ливарні (ГОСТ 2856-79). Перші маркуються буквами "МА", другі "МЛ".

Наприклад:

МА1 – магнієвий сплав, що деформується №1;

МЛ19 – ливарний магнієвий сплав №19

Сплав МЛ5 – $\sigma_B = 226 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 85 \text{ МПа}$, $\delta = 5\%$.

Сплав МА1 – $\sigma_B = 190-220 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 120-140 \text{ МПа}$, $\delta = 5-10\%$.

3.1.4 Титан та сплави на його основі

Титан – метал сірого кольору. Температура плавлення титану 1668°C . Титан має дві алотропічні модифікації: до 882°C існує α -титан (щільність $4,505 \text{ г / см}^3$), який кристалізується в гексагональній решітці з періодами $a = 0,2951 \text{ нм}$ та $c = 0,4684 \text{ нм}$, а при більш високих температурах – β -титан (при 900°C щільність $4,32 \text{ г/см}^3$), маючий решітку, період якої $a = 0,3282 \text{ нм}$. Технічний титан виготовляють двох марок: ВТ1-00, ВЕ1-0 [1,6].

Питома міцність титану вище, ніж у деяких легованих конструкційних сталей, проте, в даний час, існують леговані сталі, питома міцність яких вище, ніж у титанових сплавів, при меншій вартості. Тому титанові сплави застосовуються тільки тоді, коли потрібні унікальні хімічні або фізичні властивості титану. Титан добре обробляється тиском, зварюється, з нього можна виготовити складні виливки, але обробка різанням складна (трудомісткість обробки різанням на порядок перевищує таку для конструкційної вуглецевої сталі). При високій температурі титанові сплави схильні до газопоглинання, особливо водню. При цьому пластичність їх падає. Тому гарячу обробку титану тиском, лиття, зварювання доводиться проводити в атмосфері захисних газів, що робить виробу ще дорожчими. Титан і його сплави маркують літерами "ВТ" і порядковим номером:

ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ4, ВТ8, ВТ14.

П'ять титанових сплавів позначені інакше:

ОТ4-0, ОТ4, ОТ4-1, ПТ-7М, ПТ-3В.

Сплави на основі титану отримали значно більше застосування, ніж технічний титан. Легування титану Fe, Al, Mn, Cr, Sn, V, Si. Жаростійкість підвищують Al, Zr, Mo, а корозійну стійкість в розчинах кислот – Mo, Zr, Nb, Ta і Pd. Титанові сплави мають високу питому міцність.

Наприклад, сплав ВТ14 (Al – 5,5%, V – 1,2%, Mo – 3,0%) – $\sigma_B = 900 - 1050 \text{ МПа}$, $\delta = 10\%$, $KCU = 0,5 \text{ МДж/м}^2$, $\sigma = 400 \text{ МПа}$.

Завдяки високій корозійній стійкості титану в солоній воді з нього виготовляють корпуси підводних апаратів, ендопротези, апарати харчової промисловості та тару для харчових продуктів.

Контрольні питання

1. Чим пояснюється корозійна стійкість міді в природних середовищах?

2. Мідь якої марки (М0 або М4) має більше домішок?
3. Що таке латунь?
4. Чим відрізняються технологічні властивості однофазних і двофазних латуней?
5. Як маркують латуні, що деформуються?
6. Як маркують ливарні латуні?
7. Що таке бронза?
8. Дайте характеристику властивостей олов'яних бронз.
9. Де застосовується бронза?
10. Де застосовуються латуні?
11. Якими унікальними властивостями володіє алюміній?
12. Як класифікують алюмінієві сплави?
13. Які компоненти зазвичай використовують для легування алюмінієвих сплавів?
14. Чим модифікують силуміни?
15. З якою метою модифікують силуміни?
16. Які властивості титану?
17. Приклади застосування титану і його сплавів в промисловості.
18. Які властивості магнію?

3.2 Будівельні матеріали та їх основні властивості

3.2.1 Будівельні матеріали

Будівельні матеріали та вироби, що застосовуються при будівництві, реконструкції і ремонті різних будівель і споруд, діляться на природні і штучні, які в свою чергу поділяються на дві основні категорії: до першої категорії відносять: цеглу, бетон, цемент, лісоматеріали та ін. Їх застосовують при зведенні різних елементів будівель (стін, перекриттів, покриттів, підлог). До другої категорії – спеціального призначення: гідроізоляційні, теплоізоляційні, акустичні та ін. [7,8].

Основними видами будівельних матеріалів і виробів є: кам'яні природні будівельні матеріали з них; в'яжучі матеріали неорганічні і органічні; лісові матеріали та вироби з них; металеві вироби. Залежно від призначення, умов будівництва і експлуатації будівель і споруд підбираються відповідні будівельні матеріали, які володіють певними якостями і захисними властивостями від впливу на них різного зовнішнього середовища. З огляду на ці особливості, будь-який будівельний матеріал повинен володіти певними будівельно-технічними властивостями. Наприклад, матеріал для зовнішніх стін будівель повинен володіти найменшою теплопровідністю при достатній міцності, щоб захищати приміщення від зовнішнього холоду; матеріал споруди гідромеліоративного призначення – водонепроникність і стійкість до чергуючих зволоження і висихання; матеріал для покриття доріг (асфальт, бетон) повинен мати достатню міцність і малу стиранність, щоб витримати

навантаження від транспорту.

Класифікуючи матеріали та вироби, необхідно пам'ятати, що вони повинні володіти хорошими *властивостями і якостями*.

Властивість – характеристика матеріалу, що виявляється в процесі його обробки, застосування або експлуатації.

Якість – сукупність властивостей матеріалу, які обумовлюють його здатність задовольняти певним вимогам відповідно до його призначення.

Властивості будівельних матеріалів і виробів класифікують на три основні групи: фізичні, механічні, хімічні, технологічні та ін.

До хімічних відносять здатність матеріалів чинити опір дії хімічно агресивного середовища, що викликає в них обмінні реакції, що призводять до руйнування матеріалів, зміни своїх первинних властивостей: розчинність, корозійна стійкість, стійкість проти гниття, твердіння.

Фізичні властивості: середня, насипна, справжня і відносна щільність; пористість, вологість, вологовіддача, теплопровідність.

Механічні властивості: межі міцності при стисненні, розтягненні, вигині, зсуві, пружність, пластичність, жорсткість, твердість.

Технологічні властивості: легкоукладальність, теплостійкість, плавлення, швидкість затвердіння і висихання.

3.2.1.1 Фізичні та хімічні властивості будівельних матеріалів

Середня щільність ρ_0 маси m одиниці об'єму V_1 абсолютно сухого матеріалу в природному стані; вона виражається в г/см^3 , кг/л , кг/м^3 .

Насипна щільність сипучих матеріалів ρ_n маси m одиниці об'єму V_n просушеного вільно насипаного матеріалу; вона виражається в г/см^3 , кг/л , кг/м^3 .

Істинна щільність ρ маси m одиниці об'єму V матеріалу в абсолютно щільному стані; вона виражається в г/см^3 , кг/л , кг/м^3 .

Відносна щільність $\rho(\%)$ – ступінь заповнення обсягу матеріалу твердою речовиною; вона характеризується відношенням загального обсягу твердої речовини V в матеріалі до всього обсягу матеріалу V_1 або відношенням середньої щільності матеріалу ρ_0 до її істинної щільності ρ :

$$\rho = \left(\frac{V}{V_1} \right) \cdot 100, \text{ або } \rho = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right) \cdot 100.$$

Пористість Π – ступінь заповнення обсягу матеріалу порами, пустотами, газоповітряними включеннями:

$$\text{для твердих матеріалів: } \Pi = \left[\frac{(\rho - \rho_0)}{\rho} \right] \cdot 100, \text{ для сипучих: } \Pi = \left[\frac{(\rho - \rho_n)}{\rho} \right] \cdot 100$$

Гігроскопічність – здатність матеріалу поглинати вологу з навколишнього середовища і згущувати її в масі матеріалу.

Вологість $W(\%)$ – відношення маси води в матеріалі $m_e = m_1 - m$ до його маси його в абсолютно сухому стані m : $W = \left[\frac{(m_1 - m)}{m} \right] \cdot 100$

Водопоглинання B – характеризує здатність матеріалу при зіткненні з водою вбирати і утримувати її в своїй масі. Розрізняють масове B_m и об'ємне B_o водопоглинання.

Масове водопоглинання (%) – відношення маси поглиненої матеріалом води m_e до маси матеріалу в абсолютно сухому стані m : $B_m = \left(\frac{m_e}{m} \right) \cdot 100$

Об'ємне водопоглинання (%) – відношення обсягу поглиненої матеріалом води m_e/ρ_e до його об'єму в водонасиченому стані V_2 : $B_o = \left[\frac{m_e}{(\rho_e \cdot V_2)} \right] \cdot 100$

Вологовіддача – здатність матеріалу віддавати вологу.

3.2.1.2 Механічні властивості будівельних матеріалів

Межа міцності при стисненні R – відношення руйнуючого навантаження $P(H)$ до площі перетину зразка F (см²). Вона залежить від розмірів зразка, швидкості прикладання навантаження, форми зразка, вологості.

Межа міцності при розтягуванні R_p – відношення руйнуючого навантаження P до первісної площі перетину зразка F .

Межа міцності при вигині R_u – визначають на спеціально виготовлених балочках.

Жорсткість – властивість матеріалу давати невеликі пружні деформації.

Твердість – здатність матеріалу (металу, бетону, деревини) чинити опір проникненню в нього під постійним навантаженням сталевий кульки.

3.3 Пластичні маси

Пластмасами називають штучні матеріали, одержувані на основі органічних полімерних зв'язуючих речовин [9].

3.3.1 Склад і властивості пластмас

Обов'язковим компонентом пластмаси є сполучна речовина. В якості сполучних для більшості пластмас використовують синтетичні смоли, рідше застосовують ефіри целюлози.

Іншими важливими компонентами пластмас є наповнювачі (порошкоподібні, волокнисті та інші речовини), барвники, пластифікатори, стабілізатори. Наповнювачі підвищують механічні властивості, знижують усадку при пресуванні і додають матеріалу ті чи інші специфічні властивості.

Властивості пластмас залежать від складу окремих компонентів, їх поєднання і кількісного відношення, що дозволяє змінювати характеристики пластиків в достатньо широких межах.

3.3.2 Термопластичні пластмаси

В основі термопластичних пластмас лежать полімери лінійної або розгалуженої структури, іноді до складу полімерів вводять пластифікатори.

3.3.2.1 Неполлярні термопластичні пластмаси

Поліетилен – продукт полімеризації безбарвного газу етилену, що відноситься до кристалізуючихся полімерів.

Чим вище щільність і кристалічність поліетилену, тим вище міцність і теплостійкість матеріалу. Він хімічно стійкий і при нормальній температурі не розчиняється ні в одному з відомих розчинників. Недолік – його схильність до старіння.

Застосовують для виготовлення труб, плівок, литих і пресованих деталей, що не піддаються інтенсивним механічним навантаженням.

Поліпропілен – жорсткий нетоксичний матеріал з високими фізико-механічними властивостями. Недолік поліпропілену його невисока морозостійкість (от -10 до -20°C).

Полістирол – твердий, жорсткий, прозорий, аморфний полімер. Зручний для механічної обробки, добре забарвлюється, розчинний в бензині. Недолік його – невисока теплостійкість, схильність до старіння і утворення тріщин. З полістиролу виготовляють деталі для радіотехніки, телебачення і приладів, судини для води і багато іншого.

Фторопласт – 4 є аморфно-кристалічним полімером. Руйнування матеріалу відбувається при температурі вище 415°C. Він стійкий до впливу розчинників, кислот, лугів, не змочується водою. Застосовують його для виготовлення труб, вентилів, кранів, насосів, мембран, прокладок ущільнювачів, манжет і ін.

3.3.2.2 Полярні термопластичні пластмаси

Фторопласт – 3 – полімер трифторхлоретилену. Його використовують як низькочастотний діелектрик, крім того, з нього виготовляють труби, шланги, клапани, насоси, захисні покриття металів та ін.

Органічне скло – це прозорий аморфний термопласт на основі складних ефірів акрилової і метакрилової кислот. Матеріал більш ніж в 2 рази легше мінеральних стекол, відрізняється високою атмосферостійкістю, оптично прозорий. Недоліком його є невисока поверхнева твердість, що призводить до утворення подряпин на оптичних поверхнях в процесі експлуатації.

Полівінілхлорид є аморфним полімером. Пластмаси на його основі мають хороші електроізоляційні характеристики, стійкі до хімікатів, атмосферостійкі. Мають високу міцність і пружність. Але при нагріванні він розкладається з виділенням особливо отруйних речовин і при пожежі становить значну небезпеку.

Виготовляють труби, будівельні облицювальні плитки, лінолеум і т.д.

Поліаміди – це група пластмас з відомими торговими назвами капрон, нейлон, і ін. Вони тривалий час можуть працювати на стирання, ударостійкі, здатні поглинати вібрацію. Стійкі до лугів, бензину, спирту, стійкі в тропічних умовах. З них виготовляють ущільнювальні пристрої, шестерні, підшипники і інші деталі машин, тканини.

Поліуретани в залежності від вихідних речовин, що застосовуються при отриманні, можуть мати різні властивості, бути твердими, еластичними.

Поліетилентерефталат – складний поліефір, в СНД випускається під назвою лавсан, за кордоном – майлар, терілен. З лавсану виготовляють шестерні, кронштейни, канати, ремені, тканини, плівки та ін.

3.3.2.3 Термостійкі пластики

Ароматичний поліамід – фенілон. З фенілону виготовляють підшипники, зубчасті колеса, деталі електро- радіопередавачів.

Полібензомідазоли є ароматичними гетероциклічними полімерами. Мають високу термостійкість, хорошими показники міцності. Застосовують у вигляді плівок, волокон, тканин спеціальних костюмів.

3.3.2.4 Термореактивні пластмаси

Пластмаси з порошковими наповнювачами (Волокніти, азбоволокніти, стело-волокніти).

Волокніти є композиціями з волокнистого наповнювача у вигляді очосів бавовни, просоченого фенол-формальдегідними сполучниками. Застосовують для виготовлення деталей працюючих на вигин і кручення.

Азбоволокніти містять наповнювачем азбест, сполучник фенол-формальдегідна смола. З них отримують кислототривкі апарати, ванни і труби.

Шаруваті пластмаси (гетинакс, текстоліт, дерево-шаруваті пластики, азботекстоліт) є силовими конструкційними матеріалами. Листові наповнювачі надають пластику анізотропність. Матеріали випускають у вигляді листів, плит, труб, заготовок, з яких механічною обробкою отримують різні деталі.

3.3.2.5 Газонаповнені пластмаси

Являють собою гетерогенні дисперсні системи, що складаються з твердої і газоподібної фаз.

Пінопласти – матеріали з комірчастою структурою, в яких газоподібні наповнювачі ізольовані один від одного і від навколишнього середовища тонкими шарами полімерного сполучника. Мають гарну плавучість і високі теплоізоляційні властивості.

Застосовують для теплоізоляційних кабін, контейнерів, приладів, холодильників, рефрижераторів, труб і т.п. М'які і еластичні пінопласти застосовують для амортизаторів, м'яких сидіння, губок.

Сотопласти. Виготовляють з тонких листових матеріалів. Для них характерні досить високі теплоізоляційні, електроізоляційні властивості і радіопрозорість.

Застосовують у вигляді наповнювачів багатошарових панелей в авіа- і суднобудуванні для несучих конструкцій.

3.3.2.6. Композиційні матеріали з неметалевою матрицею

Карбоволокніти є композиціями, що складаються з полімерного сполучника (матриці) та зміцнювачів у вигляді вуглецевих волокон (карбоволокон).

Вони зберігають міцність при дуже високих температурах, а також при низьких температурах.

Епоксифенольні карбоволокніти КМУ-1л, зміцнений вуглецевою стрічкою, і КМУ-1У на джгуті можуть довго працювати при температурі до 200°C.

Карбоволокніти відрізняються високим статичним і динамічним опором втомі, водо- і хімічно стійкі, мають високу міцність, легкі (щільність 1,4т / м³), мають дуже високу ударну в'язкість (50кДж / м²).

Висока вартість цих матеріалів стримує їх широке застосування. Але в сучасній військової авіації унікальні властивості бойової техніки досягаються широким їх застосуванням.

Бороволокніти являють собою композиції полімерного сполучника та зміцнювача - борних волокон. Відрізняються високою міцністю при стисненні, зсуві і зрізі, низькою повзучістю, теплопровідністю і електропровідністю.

Бороволокніти КМБ-1 і КМБ-1к призначені для тривалої роботи при температурі 200 °С.

Вироби з Бороволокніту застосовують в авіаційній техніці. КМБ-1к – щільність 2,0т / м³, ударна в'язкість 78кДж / м².

Органоволокніти являють собою композиційні матеріали, що складаються з полімерного сполучника та зміцнювачів у вигляді синтетичних волокон. Вони стійкі в агресивних середовищах і у вологому тропічному кліматі; діелектричні властивості високі, а теплопровідність низька.

Органоволокніти застосовують в якості ізоляційного і конструкційного матеріалу в електро- радіопромисловості, авіаційній техніці, автобудуванні; з них виготовляють труби, ємності.

3.4 Гумові матеріали

Гумою називається продукт спеціальної обробки (вулканізації) каучуку і сірки з різними добавками.

Гума відрізняється від інших матеріалів високими еластичними властивостями, які притаманні каучуку – головному початковому матеріалу гуми. Для гумових матеріалів характерна висока стійкість до стирання, газо- і

водонепроникність, хімічна стійкість, електроізолюючі властивості і невелика щільність.

Контрольні питання

1. Визначте, що таке пластмаса?
2. Поясніть поведінку пластмас при підвищенні температури?
3. Вкажіть, які речовини у виробництві пластмас застосовуються в якості сполучних, наповнювачів, пластифікаторів, барвників?
4. Що додають в пластмаси для підвищення механічних властивостей?
5. Що додають в пластмаси для уповільнення старіння?
6. Що додають в пластмаси для зменшення крихкості?
7. Вкажіть застосування природних і синтетичних смол?
8. Перерахуйте, які деталі виготовляють з шаруватих пластиків?
9. Поясніть, що являють собою еластомери?
10. Вкажіть склад і властивості гум?

4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ І КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Метали в природі, в основному, зустрічаються у вигляді сполук, які можуть перебувати як в концентрованому вигляді, так і вельми розосереджено. Так сполуки заліза зустрічаються у вигляді величезних (млрд. тонн) покладів при утриманні з'єднання заліза більше 20%. Для ряду ж металів зміст їх з'єднань в породі вище 0,1% вважається досить економічним для видобутку.

Саме високий вміст сполук заліза в родовищах визначає широке застосування чорних металів (чавуну і сталі).

Виробничі процеси отримання різних металів вельми своєрідні, але всі вони включають такі основні стадії:

Видобуток руди – збагачення руди – отримання металу – рафінування [1,9].

4.1 Видобуток руди

Видобуток руди ведеться відкритим способом, в кар'єрах, якщо глибина залягання руди невелика (менше 100 м), а товщина рудного тіла велика, і в шахтах, якщо руда залягає глибоко, а товщина рудних пластів мала. Відкритий спосіб видобутку більш економічний, проте пов'язаний з істотною зміною ландшафту і виїмкою величезної маси порожньої породи, розташованої над рудним тілом. Видобуток же руди в шахтах вимагає великих витрат праці і тільки при досить потужних по товщині пластах і пологом їх залягання може бути механізованим та автоматизованим.

При відкритому способі видобутку руди робота включає:

– підготовку земної поверхні (рубка лісу, осушення боліт, відведення русел річок в сторону і т.д.)

– розкривні роботи (видалення гірських порід, що залягають над рудним тілом)

– видобувні роботи (витяг корисних копалин), які включають в себе буропідбивні роботи і виїмку, виконувану екскаваторами.

Це основний спосіб видобутку залізної руди. Також добувають руди алюмінію, титану.

4.2 Збагачення руди

Для вилучення металу з руди необхідно підвищити його зміст в руді. Але так як поєднання металу перемішано з порожньою породою, то для його відділення доводиться руду ретельно дробити і навіть розмелюють в найтонший порошок. І чим менше частки з'єднання металу за розмірами, тим в більш дрібний порошок повинна бути подрібнена добута руда.

В даний час застосовуються різні види дробарок і млинів для перетворення руди і породи в порошок. Найдрібніші частинки цього порошку можна відокремити один від одного використовуючи відміну властивостей з'єднання металу від властивостей порожньої породи. Так деякі види сполук заліза намагнічені і їх легко відокремити магнітною сепарацією. Якщо використовується різна змочуваність частинок руди і порожньої породи, то використовується метод флотації. У деяких випадках застосовується хімічне відділення, засноване на розчиненні сполуки елемента, що витягується, в різного роду розчинниках. Природно порожня порода в цьому розчиннику не повинна розчинятися.

4.3 Відновлення металу

4.3.1 Термохімічне відновлення металу

Здійснюється впливом на з'єднання металу будь-яким відновником при високій температурі.

Наприклад, залізо зазвичай міститься в руді у вигляді окислів Fe_2O_3 або Fe_3O_4 і відновлюється чадним газом (CO), що утворюється при горінні коксу (продукту переробки кам'яного вугілля) в доменних печах.



Утворюється залізо, у вигляді крапель, стікає в горн, звідки періодично випускається. Зверху печі також періодично відбувається підсипка шихти (суміші руди, коксу і флюсів). Таким чином горіння в печі підтримується безперервно протягом тривалого часу, від 5 до 10 років.

В залізі, що утворюється, при високій температурі розчиняється вуглець коксу, що призводить до отримання сплаву заліза з вуглецем, при вмісті останнього вище 2% (але не більше 6,67%). Такий сплав вельми твердий і крихкий і називається чавуном.

Добова продуктивність доменної печі досягає 2500 т. чавуну. Хоча чавун, як конструкційний матеріал, застосовується для відливання заготовок різних деталей машин (станіни, корпусу двигунів, зубчасті колеса і т.д.), але більша його частина переробляється в сталь – сплав заліза з вуглецем при вмісті вуглецю менше 2 %.

Знизити вміст вуглецю в чавуні і, тим самим, перетворити його в сталь можна окислюючи надлишковий вуглець в рідкому чавуні. Для цього застосовуються конвертерний і мартенівський методи отримання сталі.

4.3.2 Конвертерний спосіб отримання сталі

Сутність конвертерного методу виробництва сталі полягає в окисленні надлишкового вуглецю продуванням через рідкий чавун кисню.

При цьому, природно, згоряє і деяка частина заліза. Реакція є екзотермічною, тому в рідкий чавун можна додати деяку частину металевого брухту, який під час продування киснем розплавляється.

Процес протікає досить швидко (менш 20хв). Продуктивність процесу залежить від обсягу конвертера (від 3 до 250т.).

4.3.3 Мартенівський спосіб отримання сталі

У мартенівських печах виходить понад 80% виробленої сталі. Плавка шихти здійснюється за рахунок горіння палива, в якості якого використовуються горючі газу, мазут, вугільний пил, тощо.

Ємність мартенівських печей від 35 до 500 т., але тривалість процесу становить кілька годин. При цьому можливо здійснювати контроль складу, вводити легуючі елементи.

Термохімічним способом відновлюють багато металів, наприклад, мідь. Плавку мідних руд ведуть в полум'яних печах, в яких відбувається відновлення міді, але через високий вміст в руді сполук заліза і сірки утворюється "мідний штейн", в якому міститься 20-50% міді, 20-40% заліза і 22-25% сірки.

Отриманий штейн переробляється в чорнову мідь в конвертерах. Продуваючи через рідкий штейн повітря, проводять окислювання заліза, яке спливає на поверхню у вигляді оксидів, сірка вигорає з утворенням величезної кількості окису сірки, використовуваної як сировини для виробництва сірчаної кислоти.

В результаті процесу отримують чорнову мідь (98,5-99,5% Cu), яку можна використовувати для виробництва мідних сплавів, але яка не придатна для електротехнічної промисловості (для виробництва дротів).

4.3.4 Відновлення металу електролізом

Ряд металів, через їх високу хімічну активність, складно відновлювати термохімічним шляхом. Тому їх відновлення проводять електролізом

розплавлених сполук. В даний час це основний спосіб отримання алюмінію і магнію.

4.3.5 Фізичне відділення металу

Фізичні методи відділення металів використовуються в даний час для отримання металів, що зустрічаються в самородному стані (золото, платина). При цьому використовуються такі процеси як промивка, розчинення в ртуті (змішення) з подальшим випаровуванням ртуті.

4.3.6 Рафінування

Багато метали після їх отримання термохімічним методом, електролізом містять неприпустимо велику кількість домішок.

Так, вміст домішок в алюмінії або міді вище 0,1 % робить їх непридатними для застосування в якості провідників струму.

Вміст сірки або фосфору в сталі вище 0,025 % істотно погіршує її механічні властивості як в холодному, так і гарячому стані.

Методи рафінування (очищення) дозволяють отримати чисті метали, але природно призводять до додаткових витрат. Тому чистий метал може бути істотно дорожчим.

Так алюміній чистотою 99,7 %, застосовуваний для виробництва сплавів, коштує 1,5 \$ / кг, в той час як надчистий алюміній для електронної промисловості чистотою 99,9999 % коштує в тисячі разів дорожче.

Для очищення сталей від шкідливих домішок і введення в них корисних легуючих елементів застосовують переплавлення сталі під шаром спеціальних шлаків поглинаючих шкідливі домішки. Плавку ведуть в електродугових або індукційних печах з контрольованою атмосферою або в вакуумі.

Для очищення міді застосовують електролітичне рафінування (до 95% усієї виробленої в країні міді). При цьому отриману чорнову мідь розчиняють в електроліті (10-16 % мідного купоросу + 10-15 % сірчаної кислоти).

Розчинення відбувається при пропусканні через розчин електричного струму. Розчинена мідь (іони) осідають на катодах, заздалегідь виконаних з тонких листів чистої міді.

Процес триває 10-12 діб, причому на кожному катоді (всього їх у ванні 20-40 шт.) осідає 60-90 кг чистої міді (99,95 %). При цьому електрична потужність ванни досягає 2000 кВт. Таким же чином отримують чистий нікель.

Основна маса металів застосовується в промисловості у вигляді сплавів. Це пояснюється більш високими механічними властивостями сплавів. З чистих металів практично неможливо виготовити деталі машин, так як міцність їх на порядок менше, ніж міцність сплавів на їх основі.

Тому чисті метали застосовуються тільки в тих випадках, коли потрібні їх інші фізичні властивості (електропровідність, теплопровідність, хімічна стійкість, здатність поглинати або пропускати нейтрони і т.д.).

Контрольні питання:

1. Що називається рудою і які руди використовуються для отримання металів? Назвіть способи збагачення руд?
2. Призначення флюсів при отриманні металів і види флюсів?
3. Назвіть продукти доменної плавки і вкажіть області їх застосування?
4. Основна мета доменного процесу?
5. Джерело тепла в мартенівській печі?
6. Спосіб, при якому утруднена виплавка високолегованих сталей?
7. Основний вихідний матеріал для отримання сталі в кисневих конвертерах?
8. Спосіб виплавки високоякісних сталей?
9. Тривалість плавки в кисневих конвертерах?

5 ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Термічною обробкою називається сукупність операцій нагрівання, витримки та охолодження твердих металевих сплавів з метою отримання заданих властивостей за рахунок зміни внутрішньої будови і структури. На результат термічної обробки впливають такі чинники: час (швидкість) нагрівання, температура нагріву, час (тривалість) витримки, час (швидкість) охолодження. Таким чином, основними факторами термічної обробки є температура і час (рис. 5.1).

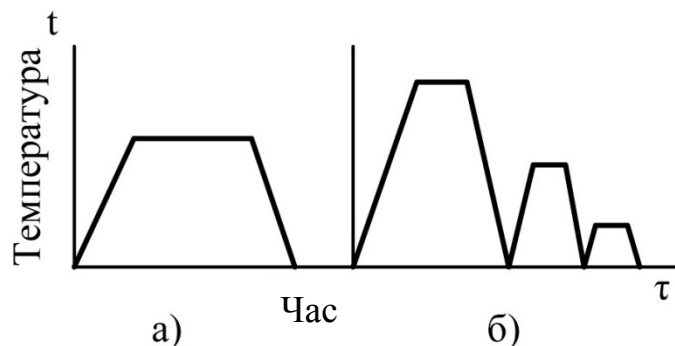


Рисунок 5.1 – Графік термічної обробки: а – простої; б – складної

Якщо термічна обробка складається лише з однієї операції, то вона називається простою (див. рис.5.1, а), а якщо з декількох операцій – складною.

Швидкість нагріву вибирається залежно від теплопровідності сталі (хімічного складу) та форми деталі. Якщо теплопровідність сталі висока, то і швидкість нагріву може бути більше. При цьому слід мати на увазі, що у більшості легованих сталей теплопровідність нижче, ніж у вуглецевих, і швидке нагрівання може призвести до виникнення в них напружень і тріщин. Заготовки або деталі простої форми з тієї ж причини можна гріти швидше, ніж складної.

Температура нагріву залежить від складу сталі і виду термообробки. Для вуглецевих сталей вона може бути визначена по діаграмі Fe_3C , для легованих

приводиться в довідниках. Відзначимо, що для кожної сталі при певному виді термообробки ця температура величина постійна [3,10,13].

Тривалість витримки залежить головним чином від розмірів деталей і умов нагрівання. При нагріванні деталей в газових або електричних печах витримка зазвичай призначається з розрахунку 1,5-2 хв. на 1мм максимальної товщини деталі (за умови що деталі в печі не стикаються одна з одною). При нагріванні в рідких середовищах (наприклад, в соляних ваннах), де умови теплообміну дуже високі, тривалість витримки береться 10-15 сек. на 1 мм товщини.

Як охолоджувачі зазвичай застосовують воду, водні розчини солей, лугів, мінеральні масла, кремнійорганічні рідини, іноді - повітря. Середні швидкості охолодження, що забезпечуються різними охолоджуючими середовищами, наведені в табл. 5.1.

При уявній простоті цих операцій в сталі протікають складні процеси, які і визначають властивості після термічної обробки. Термічна обробка підрозділяється на попередню і остаточну. Попередня термічна обробка (відпал і нормалізація) застосовується при підготовці структури сталі для подальшої обробки.

Таблиця 5.1 – Середня швидкість охолодження в різних охолоджувачах

Вид охолоджувача	Середня швидкість охолодження, °C/с
Повітря	5
Масло	150
Вода, 20°C	700
Вода, 80°C	140
Вода + 10% NaCl	2100
Вода + 10% NaOH	1600

В якості остаточної термообробки застосовують, як правило, загартування з наступним відпуском. Іноді остаточною операцією можуть бути відпал, частіше нормалізація, якщо за умовами роботи деталі ці операції дають потрібні механічні властивості.

5.1 Відпал

Відпалом сталі називається вид термічної обробки, що полягає в її нагріванні до певної температури, витримці при цій температурі і повільному охолодженні. Цілі відпалу – зниження твердості і поліпшення оброблюваності сталі, зміна форми і величини зерна, вирівнювання хімічного складу, зняття внутрішніх напружень. Існують різні види відпалу: повний, неповний, дифузний, ре кристалізаційний, низький, відпал на зернистий перліт, нормалізація. Температури нагріву сталі для ряду видів відпалу пов'язані з розміщенням ліній діаграми Fe-Fe₃C. Низька швидкість охолодження зазвичай

досягається при охолодженні сталі разом з піччю.

Повний відпал застосовується для доєвтектоїдних сталей. Нагрівання сталі для повного відпалу здійснюється на 30 – 50 °С вище лінії GS діаграми Fe-Fe₃C (рис. 15). При цьому відбувається повна перекристалізація сталі та зменшення величини зерна. Вихідна структура з великих зерен фериту і перліту при нагріванні перетворюється в аустенітну, а потім при повільному охолодженні в структуру з дрібних зерен фериту і перліту. Підвищення температури нагріву привело б до зростання зерна. При повному відпалі знижується твердість і міцність сталі, а пластичність підвищується.

При неповному відпалі нагрів проводиться на 30 – 50 °С вище лінії PSK діаграми Fe-Fe₃C (рис. 5.2). Він проводиться, якщо вихідна структура не дуже грубозерниста або не потребує зміни розташування феритної (в доєвтектоїдних сталях) або цементитної (в заєвтектоїдних сталях) складової. При цьому відбувається лише часткова перекристалізація - тільки перлітної складової сталі.

Дифузійний відпал (гомогенізація) полягає в нагріванні сталі до 1000... 1100 °С, тривалій витримці (10 – 15 годин) при цій температурі і наступному повільному охолодженні. В результаті дифузійного відпалу відбувається вирівнювання неоднорідності сталі за хімічним складом. Завдяки високій температурі нагріву і тривалій витримці виходить грубозерниста структура, яка може бути усунена наступним повним відпалом.

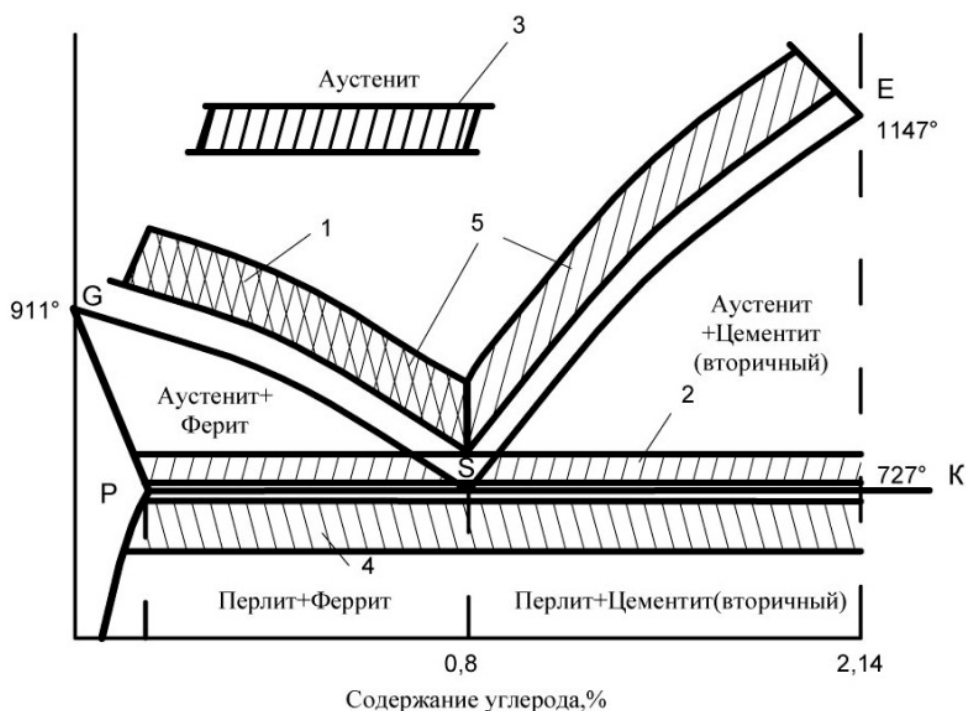


Рисунок 5.2 – Области температур нагрівання для різних видів відпалу:
1 – повний відпал; 2 – неповний відпал; 3 – дифузійний відпал; 4 – відпал рекристалізації; 5 – нормалізація

Рекристалізаційний відпал призначений для зняття наклепу і внутрішніх напружень після холодної деформації і підготовки структури до

подальшого деформування. Нагрівання необхідно здійснювати вище температури рекристалізації, яка для заліза становить 450 °С. Зазвичай для підвищення швидкості рекристалізаційних процесів застосовують значно вищі температури, які, проте, повинні бути нижче лінії PSK діаграми Fe-Fe₃C. Тому температура нагріву для рекристалізаційного відпалу становить 650...700 °С. В результаті рекристалізаційного відпалу утвориться однорідна дрібнозерниста структура з невеликою твердістю і значною в'язкістю.

Низький відпал застосовується в тих випадках, коли структура сталі задовільна і необхідно тільки зняти внутрішні напруження, що виникають при кристалізації або після механічної обробки. В цьому випадку сталь нагрівають значно нижче лінії PSK діаграми Fe-Fe₃C (200 – 600 °С).

Відпал на зернистий перліт (сфероїдизацію) застосовують для сталей близьких за евтектоїдним складом або для заевтектоїдних. Такий відпал здійснюють маятниковим способом (температуру кілька разів змінюють поблизу лінії PSK, то перегріваючи вище на 30 – 50 °С, то охолоджуючи нижче на 30 – 50 °С) або шляхом тривалої витримки (5-6 годин) при температурі трохи вище лінії PSK і подальшого повільного охолодження. Після такого відпалу цементит, зазвичай присутній в структурі у вигляді пластин, набуває зернисту форму. Сталь зі структурою зернистого перліту володіє більшою пластичністю, меншою твердістю і міцністю в порівнянні з пластинчастим перлітом. Відпал на зернистий перліт застосовується для підготовки сталей до загартування або для поліпшення їх оброблюваності різанням.

Нормалізація складається з нагріву сталі на 30 – 50 °С вище лінії GSE діаграми Fe-Fe₃C (рис. 5.2), витримки при цій температурі і подальшого охолодження на повітрі. Більш швидке охолодження в порівнянні зі звичайним відпалом призводить до більш дрібнозернистої структури. Нормалізація – більш дешева термічна операція, ніж відпал, тому що печі використовують тільки для нагрівання і витримки. Для низьковуглецевих сталей (до 0,3% С) різниця у властивостях між нормалізованим і відпаленим станом практично відсутня і ці сталі краще піддавати нормалізації. При більшому вмісті вуглецю нормалізована сталь має більшу твердість і меншу в'язкість, ніж відпалена. Іноді нормалізацію вважають самостійним різновидом термічної обробки, а не видом відпалу.

5.2 Загартування і відпуск сталі

При повільному охолодженні сталі утворюються структури, відповідні діаграмі Fe-Fe₃C. Спочатку відбувається виділення фериту (в доевтектоїдних сталях) або вторинного цементиту (у заевтектоїдних сталях), а потім відбувається перетворення аустеніту в перліт. Це перетворення полягає в розпаді аустеніту на ферит, майже не містить вуглецю і цементит, що містить 6,67 % С. Тому перетворення супроводжується дифузією, перерозподілом вуглецю. Дифузійні процеси відбуваються протягом деякого часу, причому швидкість дифузії різко падає зі зниженням температури. Зазвичай вивчають ізотермічне перетворення аустеніту (що відбувається при витримці при

постійній температурі) для евтектоїдної сталі. Вплив температури на швидкість і характер перетворення представляють у вигляді діаграми ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 5.3).

Діаграма будується в координатах температура – логарифм часу. Вище температури 727 °С на діаграмі знаходиться область стійкості аустеніту. Нижче цієї температури аустеніт є нестійким і перетворюється в інші структури. Перша С – подібна крива на діаграмі відповідає початку перетворення аустеніту, а друга – його завершення. При невеликому переохолодженні – приблизно до 550 °С відбувається згадане вище дифузійне перлітне перетворення.

Залежно від ступеня переохолодження утворюються структури, звані **перліт, сорбіт і тростит**. Це структури одного типу – механічні суміші фериту і цементиту, що мають пластинчасту будову. Відрізняються вони лише ступенем дисперсності, тобто товщиною пластинок фериту і цементиту.

Найбільш крупно-дисперсна структура – перліт, найбільш дрібнодисперсна – тростит. При переохолодженні аустеніту приблизно нижче 240 °С швидкість дифузії падає майже до нуля і відбувається бездифузійне **мартенситне перетворення**. Утворюється мартенсит – пересичений твердий розчин вуглецю в α -заліза (див. рис. 5.4). Мартенсит має ту ж концентрацію вуглецю, що і вихідний аустеніт [11,12]. Через високу пересиченість вуглецем решітка мартенситу сильно спотворюється, завдяки чому мартенсит має високу твердість (до HRC 65). Горизонтальна лінія M_n діаграми відповідає початку перетворення аустеніту в мартенсит, а лінія M_k – завершення цього процесу.

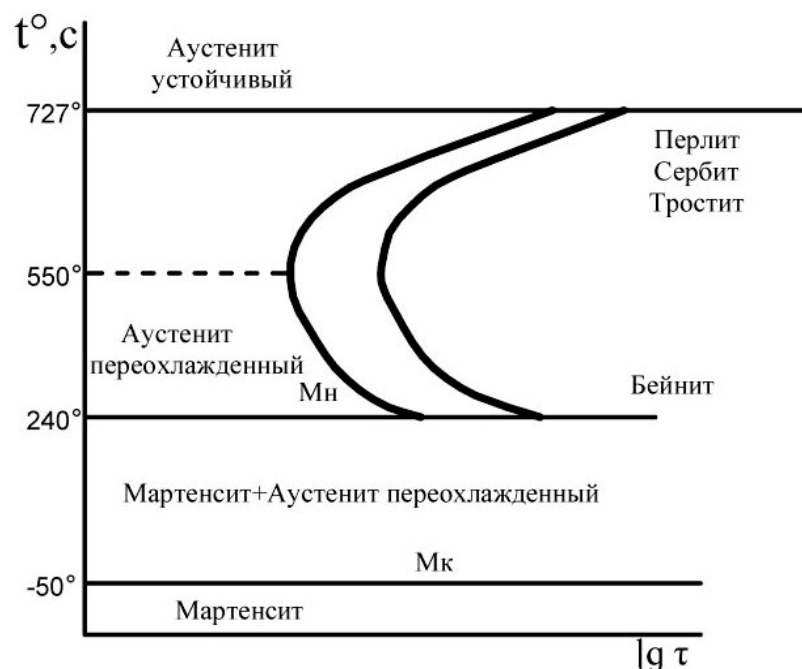


Рисунок 5.3 – Схема діаграми ізотермічного перетворення аустеніту сталі евтектоїдного складу

У діапазоні температур від мартенситного до перлітного перетворення відбувається проміжне перетворення і утворюється структура, звана бейніт.



Рисунок 5.4 – Дрібноголчастий мартенсит, сталь марки У8, $\times 500$

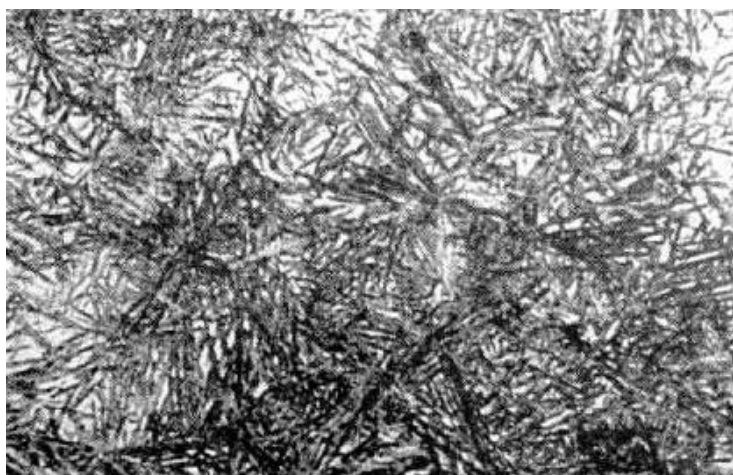


Рисунок 5.5 – Бейніт нижній (голчастий), $\times 1000$

Загартування – це вид термічної обробки, що полягає в нагріванні сталі до певної температури, витримці і наступному швидкому охолодженні. В результаті гарту підвищується твердість і міцність, але знижується в'язкість і пластичність. Нагрівання сталі проводиться на $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище лінії GSK діаграми Fe-Fe₃C. У доевтектоїдних сталях нагрів вище лінії GS необхідний для того, щоб після гарту в структурі не було м'яких феритних включень. Для заевтектоїдних сталей застосовується нагрівання вище лінії SK, так як присутність цементиту не знижує твердість сталі.

Зазвичай в результаті гарту утворюється мартенситна структура. Тому охолоджувати сталь слід з такою швидкістю, щоб крива охолодження не перетинала С-подібні криві діаграми ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 5.3). Для досягнення високої швидкості охолодження, деталі, що загартовуються, занурюють у воду (для вуглецевих сталей) або мінеральні

масла (для легованих сталей).

Здатність сталі гартуватися на мартенсит називається загартовуваністю. Вона характеризується значенням твердості, що набувається сталлю після гарту і залежить від вмісту вуглецю. Сталі з низьким вмістом вуглецю (до 0,3%) практично не гартуються і гарт для них не застосовується.

Прогартовуваністю називається глибина проникнення загартованої зони. Відсутність наскрізної прогартовуваності пояснюється тим, що при охолодженні серцевина остигає повільніше, ніж поверхня. Прогартовуваність характеризує критичний діаметр $d_{кр}$, тобто максимальний діаметр деталі циліндричного перетину, яка прогартовується наскрізь в даному охолоджувачі.

Відпуск сталі – це вид термічної обробки, що слідує за загартуванням і полягає в нагріві сталі до певної температури (нижче лінії PSK), витримці і охолодженні. Мета відпуску – отримання більш рівноважної в порівнянні з мартенситом структури, зняття внутрішніх напружень, підвищення в'язкості і пластичності. Розрізняють низький, середній і високий відпуск.

Низький відпуск проводиться при температурі 150 – 200 °С. В результаті знімається внутрішня напруга, відбувається деяке збільшення пластичності і в'язкості без помітного зниження твердості. Утворюється структура **мартенсит відпуску** (рис. 5.6). Низькому відпуску піддають ріжучий і вимірювальний інструмент, а також деталі, які повинні мати високу твердість і зносостійкість.

При **середньому відпуску** проводиться нагрів до 350 – 450 °С. При цьому відбувається деяке зниження твердості при значному збільшенні межі пружності і поліпшення опірності дії ударних навантажень. Структура сталі являє собою тростит відпуску, який має зернисту, а не пластинчасту будову. Застосовується для пружин, ресор, ударного інструменту (рис. 5.7).



Рисунок 5.6 – Мартенсит відпуску, Сталь марки У8, $\times 500$

Високий відпуск проводиться при 550 – 650 °С. В результаті твердість і міцність знижуються значно, але сильно зростають в'язкість і пластичність і виходить оптимальне для конструкційних сталей поєднання механічних властивостей.

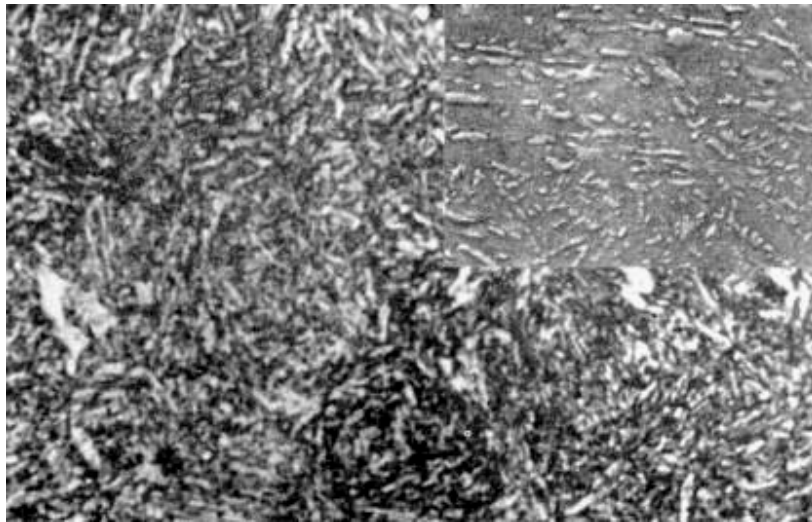


Рисунок 5.7 – Тростит відпуску, $\times 1000$ (справа вверху – то же, $\times 15000$)

Структура сталі – **сорбіт відпуску** з зернистою будовою цементиту (рис. 5.8). Застосовується для деталей, що піддаються дії високих навантажень. Термічна обробка, що складається з гарту і високого відпуску, називається поліпшенням. Вона є основним видом обробки конструкційних сталей.

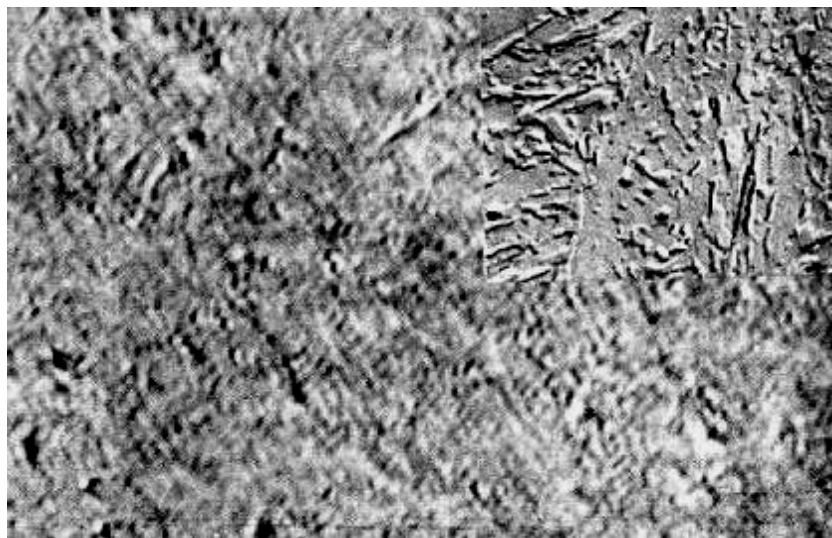


Рисунок 5.8 – Сорбіт відпуску, $\times 1000$ (справа вверху – то же, $\times 15000$)

5.3 Поверхнєве зміцнення сталі

Поверхнєве загартування полягає в нагріванні поверхневого шару сталевих деталей до аустенітного стану і швидкого охолодження з метою отримання високої твердості і міцності в поверхневому шарі в поєднанні з в'язкою серцевиною. Існують різні способи нагрівання поверхні під загартування – в розплавлених металах або солях, полум'ям газового пальника, лазерним випромінюванням, струмом високої частоти. Останній спосіб набув найбільшого поширення в промисловості.

При нагріванні струмами високої частоти загартовувану деталь розміщують всередині індуктора, що являє собою мідні трубки з циркулюючою всередині для охолодження водою. Форма індуктора відповідає зовнішній формі деталі. Через індуктор пропускають електричний струм (частотою 500 Гц – 10 МГц). При цьому виникає електромагнітне поле, яке індукує вихрові струми, що нагрівають поверхню деталі. Глибина нагрітого шару зменшується зі збільшенням частоти струму і збільшується зі зростанням тривалості нагріву. Регулюючи частоту і тривалість, можна отримати необхідну глибину загартованого шару, що знаходиться в межах 1 – 10 мм.

Перевагами гарту струмами високої частоти є регульована глибина загартованого шару, висока продуктивність (нагрів однієї деталі триває 10 с), можливість автоматизації, відсутність утворення окалини. Недолік – висока вартість індуктора, який є індивідуальним для кожної деталі. Тому цей вид загартування застосовується, в основному, у багатосерійному і масовому виробництві.

Перспективний метод поверхневого гарту сталевих деталей складної форми – лазерна обробка. Завдяки високій щільності енергії в промені лазера можливий швидкий нагрів дуже тонкого шару металу. Подальше швидке відведення тепла в обсяг металу призводить до гартування поверхневого шару з наданням йому високої твердості і зносостійкості.

Хіміко-термічна обробка – це процес зміни хімічного складу, структури і властивостей поверхні сталевих деталей за рахунок насичення їх різними хімічними елементами. При цьому досягається значне підвищення твердості і зносостійкості поверхні деталей при збереженні в'язкої серцевини. До видів хіміко-термічної обробки відносяться цементація, азотування, ціанування і ін.

Цементація – це процес насичення поверхневого шару сталевих деталей вуглецем. Цементація проводиться шляхом нагрівання сталевих деталей при 880 – 950 °С в вуглецевому середовищі, званому карбюризатором. Розрізняють два основних види цементації - газову і тверду. Газова цементація проводиться в газі, що містить метан CH_4 і оксид вуглецю CO . Тверда цементація проводиться в сталевих ящиках, куди вкладаються деталі упереміш з карбюризатором. Карбюризатором служить порошок деревного вугілля з добавкою солей Na_2CO_3 або BaCO_3 .

Цементації піддають сталі з низьким вмістом вуглецю (0,1 – 0,3%). В результаті на поверхні концентрація вуглецю зростає до 1,0 – 1,2%. Товщина цементованого шару становить 1 – 2,5 мм.

Цементацією досягається тільки вигідний розподіл вуглецю по перетину деталі, Висока твердість і зносостійкість поверхні виходить після гарту, який обов'язково проводиться після цементації. Потім проводиться низький відпуск. Після цього твердість поверхні становить HRC 60.

Азотуванням називається процес насичення поверхні сталі азотом. При цьому підвищуються не тільки твердість і зносостійкість, але і корозійна стійкість. Проводиться азотування при температурі 500 – 600 °С в середовищі аміаку NH_3 протягом тривалого часу (до 60 год.) Аміак при високій температурі розкладається з утворенням активного атомарного азоту, який і взаємодіє з

металом.

Твердість сталі підвищується за рахунок утворення нітридів легуючих елементів. Тому азотуванню піддають тільки леговані сталі. Найбільше підвищують твердість такі легуючі елементи, як хром, молібден, алюміній, ванадій. Глибина азотованого шару становить 0,3–0,6 мм, твердість поверхневого шару за Вікерсом доходить до HV 1200 (при цементації HV 900).

До переваг азотування перед цементацією слід віднести відсутність необхідності в додатковій термообробці, більш високу твердість і зносостійкість, високу корозійну стійкість поверхні. Недоліками є низька швидкість процесу і необхідність застосування дорогих легованих сталей.

Ціанування (нітроцементация) – це процес одночасного насичення поверхні сталі вуглецем і азотом. Проводиться ціанування в розплавах ціанистих солей NaCN або KCN або в газовому середовищі, що містить суміш метану CH_4 і аміаку NH_3 . Розрізняють низькотемпературне і високотемпературне ціанування.

Низькотемпературне ціанування проводиться при температурі 500 – 600 °С. При цьому переважає насичення азотом. Глибина ціанованого шару становить 0,2 – 0,5 мм, твердість поверхні – HV 1000.

При **високотемпературне ціанування** температура становить 800 – 950°С. Переважає насичення вуглецем. Глибина поверхневого шару становить 0,6 – 2,0 мм. Після високотемпературного ціанування слідкує гарт з низьким відпуском. Твердість після термообробки складає HRC 60.

Поверхнєве зміцнення пластичним деформуванням засноване на здатності сталі до наклепу при пластичної деформації. Найбільш поширеними способами такого зміцнення поверхні є дробоструменева обробка і обробка поверхні роликми або кульками.

При дробоструменевій обробці на поверхню деталі зі спеціальних дробометів направляється потік сталевого або чавунного дробу малого діаметра (0,5–1,5 мм). Удари концентруються на вельми малих поверхнях, тому виникають дуже великі місцеві тиски. В результаті підвищується твердість і зносостійкість обробленої поверхні.

Крім того, згладжуються дрібні поверхневі дефекти. Глибина зміцненого шару при дробоструменевій обробці становить близько 0,7 мм.

Обкатка роликми проводиться за допомогою спеціальних пристосувань на токарних верстатах. Крім зміцнення, обкатка знижує шорсткість оброблюваної поверхні. Глибина зміцненого шару доходить до 15 мм.

Контрольні питання

1. В яких координатах представляють графіки термічної обробки?
2. З якою метою інструментальні вуглецеві сталі піддають відпалу на зернистий перліт?
3. Для яких сталей відпал можна замінити більш дешевою термічною обробкою – нормалізацією?
4. Як змінюються механічні властивості в результаті гарту?

5. Що таке критична швидкість загартування?
6. Структура доєвтектоїдної загартованої сталі?
7. Структура заєвтектоїдної загартованої сталі?
8. Що таке мартенсит?
9. Від чого залежать властивості мартенситу?
10. Вплив масової частки вуглецю на загартовуваність сталі?
11. Які умови отримання крупногочастого і дрібногочастого мартенситу?
12. Що таке відпуск, види відпуску?
13. Основне перетворення, що протікає при відпуску?
14. Який комплекс термічної обробки називають поліпшенням?
15. Що підвищує азотування деталі?
16. Які сталі зазвичай піддають цементації?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Батышев А. И. Материаловедение и технология материалов : учеб. пособие / А. И. Батышев, А. А. Смолькин. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 288 с.
2. Богодухов С. Материаловедение : учебник / С. Богодухов. – М. : Машиностроение, 2015. – 504 с.
3. Материаловедение и технология металлов / [Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман В. М. Матюнин и др.]. – М. : Высш. шк., 2000. – 639 с.
4. Марочник сталей и сплавов / М. М. Колосов, Е. Т. Долбенко Ю. В. Каширский и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2001. – 672 с.
5. Строительные материалы. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / [В. Г. Микульский, Г. П. Сахаров и др.]. – М. : Издательство АСВ, 2007. – 520 с.
6. Попов К. Н. Строительные материалы и изделия / К. Н. Попов, М. Б. Каддо. – М. : Высшая школа, 2008. – 440 с.
7. Попов К. Н. Оценка качества строительных материалов / К. Н. Попов, М. Б. Каддо, О. В. Кульков. – М. : Высшая школа, 2004. – 287 с.
8. Семенова И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, А. В. Хорошилов, Г. М. Флорианович; под ред. И. В. Семеновой. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 376 с.

Навчальне видання

**СКУРІХІН Владислав Ігорович,
ГАРБУЗ Нонна Володимирівна**

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА ТЕХНОЛОГІЯ МАТЕРІАЛІВ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів 2 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 263 – Цивільна безпека)*

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *В. І. Скуріхін*

План 2017, поз. 119 Л

Підп. до друку 05.02.2018. Формат 60 × 84/16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 3,0
Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.