

В.В.Хільчевський, С.Є.Кондратюк, В.О.Степаненко, К.Г.Лопатько

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ

КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



Навчальний посібник

В.В.Хільчевський, С.Є.Кондратюк, В.О.Степаненко, К.Г.Лопатько

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

За редакцією В.О.Степаненка

*Рекомендовано Міністерством
освіти і науки України*

Навчальний посібник
для учнів професійно-технічних
навчальних закладів

*Розповсюдження та тиражування
без офіційного дозволу видавництва заборонено*

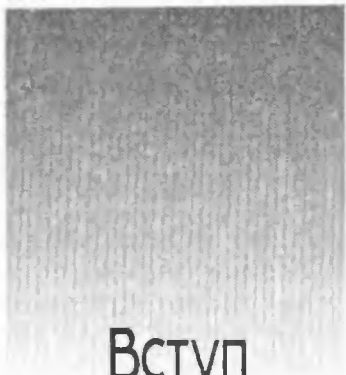
Автори: *В. В. Хільчевський* (гл. 1, 2);
С. Є. Кондратюк (гл. 3—6);
В. О. Степаненко (гл. 7, 9—12);
К. Г. Лопатько (гл. 8)

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. *П. В. Ясній*
(Тернопільський державний технічний університет
ім. І. Пулюя),
С. М. Надуваний
(директор професійно-технічного училища № 4 м. Києва)

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист № 14/18.2—1861 від 17.12.2001 р.)

Редакція літератури з природничих і технічних наук

Редактор *Т. В. Кацовенко*



Вступ

Матеріалознавство

— це прикладна наука, що вивчає будову (структуру) та властивості матеріалів, встановлює зв'язок між їхнім складом, будовою і властивостями, вивчає залежність будови і властивостей від методів виробництва та обробки матеріалів, а також зміну їх під впливом зовнішніх чинників: силових, теплових (термічних), радіаційних та інших.

Технологія

(від грецького *techne* — мистецтво, майстерність, уміння та *logos* — наука, вчення) — це сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей, форми сировини, матеріалу або напівфабриката, що здійснюються в процесі виробництва продукції (виробів). Завдання технології як науки — з'ясування фізичних, хімічних, механічних та інших закономірностей з метою визначення та практичного використання найефективніших і економічних виробничих процесів.

Технологічність

— властивість матеріалу або конструкції, яка дозволяє використати для виробництва, експлуатації та ремонту найбільш економічні технологічні процеси, що забезпечують необхідну якість.

Від *techne* походить також слово *техніка*.

Техніка

— це сукупність засобів, знарядь, створених людиною для виконання процесів виробництва (машини, апарати, механізми, пристрої, інструменти, прилади тощо).

Отже, технологія — це *способи виробництва*, техніка — це *засоби виробництва*.

Технологія пов'язана з відповідними галузями виробництва: технологія загального машинобудування, літакобудування, виготовлення будь-яких виробів, матеріалів тощо.

Ми ж будемо вивчати матеріалознавство (М) та технологію **конструкційних матеріалів (ТКМ)**.

Конструкційними

називають матеріали, з яких виготовляють деталі машин, приладів, елементи різних конструкцій, інструменти, тобто матеріали, здатні витримувати значні механічні навантаження.

Отже, ТКМ — це наука про сучасні методи одержання та обробки конструкційних матеріалів з метою виготовлення конструкцій і деталей необхідних розмірів, конфігурації, стану (чистоти) поверхні та властивостей.

Основні види обробки конструкційних матеріалів при виготовленні деталей:

- лиття;
- обробка тиском;
- зварювання;
- обробка різанням.

Основні способи обробки матеріалів для надання їм потрібних властивостей:

- термічна обробка (температурна);
- механічна;
- термомеханічна;
- термохімічна.

Рівень технічного розвитку суспільства залежить від того, якими матеріалами воно володіє. Навіть основні етапи розвитку людства визначаються матеріалами (кам'яний вік, бронзовий, вік заліза), що підкреслює важливе місце курсу матеріалознавства серед інших технічних наук.

Курси матеріалознавства і технології взаємопов'язані, оскільки технологія обробки залежить від властивостей оброблюваних матеріалів, а властивості — значною мірою — від методів виробництва матеріалів та їх обробки. В прискоренні науково-технічного поступу важлива роль відводиться машинобудуванню. Сучасне машинобуду-

вання характеризується безперервним зростанням енергонапруженості, екстремальними параметрами (граничні механічні навантаження, високі та низькі температури, агресивні середовища, високий рівень радіації тощо), тому в багатьох випадках тільки надання специфічних властивостей матеріалам, що застосовуються, можна забезпечити надійність і довговічність машин. Нові технології, що пов'язані з використанням надвисоких температур і тиску, лазера, плазми, електропорошкової металургії, енергії вибуху, електро- і магнітоімпульсної обробки тощо, дають змогу одержувати та синтезувати такі матеріали, яких раніше людство не лише не мало, але й не знало, або які взагалі в природному стані не зустрічаються (надтверді, надміцні, жаростійкі тощо).

Отже, завдання матеріалознавства взагалі — це *розробка нових і вдосконалення існуючих матеріалів*. Завдання ж курсу “Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів” як складової частини загальної технологічної підготовки спеціалістів — навчити майбутніх спеціалістів-машинобудівників, як, знаючи силові, температурні та інші умови роботи деталі, визначити необхідні властивості матеріалу й забезпечити їх належним вибором хімічного складу матеріалу деталі, режимів термічної, механічної та інших видів його обробки; у кожному конкретному випадку вибрати і призначити найбільш простий, економічний (дешевий), з мінімумом затрат матеріалу, праці та енергії, по можливості, безвідхідний метод виготовлення деталі чи елемента конструкції.

Крім того, знання основ матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів є конче необхідними для успішного вивчення ряду спеціальних дисциплін, які формують технічну обізнаність, кваліфікацію спеціаліста.

Конструкційні матеріали, що використовуються в машинобудуванні, поділяються на *металеві й неметалеві*.

Металеві: сталі, чавуни та кольорові метали. Залізо і його сплави (сталі, чавуни) — чорні, всі інші — кольорові метали.

Неметалеві: полімери, пластмаси, гуми, деревина, силікатні матеріали — кераміка, скло та ін.

Нині в загальному обсязі застосовуваних конструкційних матеріалів пластмаси становлять дещо більше 5 % (за вагою, а не за асортиментом виготовлюваних виробів). У США вже тепер пластмаси складають більше 15 %, кольорові метали — 30 %. В Україні до недавнього часу частка чорних металів становила більше 90 %.

На цей час виробничі потужності підприємств чорної металургії України становлять по сталі 54 млн т, тобто Україна посідає четверте

місце в світі після Японії, США та Росії, випереджаючи Німеччину, Італію, Францію.

Властивості матеріалів в основному поділяються на фізичні, хімічні, технологічні й механічні.

- *Фізичні*: щільність (питома вага), тепло- й електропровідність, магнетизм та деякі інші.
- *Хімічні*: здатність взаємодіяти з довколишнім середовищем, вступати в хімічні сполучення, розчинятися, кородувати, більшою чи меншою мірою чинити опір дії агресивних середовищ.
- *Технологічні*: здатність піддаватися різним методам обробки — різанню (точіння, фрезерування, шліфування та інші), обробці тиском (прокатування, штампування, пресування, волочіння, кування), зварюванню, литтю (рідкотекучість, усадка).
- *Механічні*: твердість, міцність, жорсткість, пружність, пластичність, крихкість, зносостійкість, в'язкість, втомна міцність, жаростійкість, жароміцність, зносостійкість, дисипація енергії, повзучість та деякі інші. Ці властивості буде детально розглянуто далі, бо саме їм приділена основна увага в цьому посібнику.

Глава 1

Основні механічні властивості матеріалів та їхні характеристики

§ 1.1

Навантаження, деформація, напруження

Механічні властивості матеріалів пов'язані з поняттям про навантаження, деформацію та напруження.

Навантаження — це зовнішні сили, що прикладаються до тіла (матеріалу). Вони бувають зосереджені або розподілені по довжині, поверхні та об'єму (рис. 1.1).

Зосереджена сила позначається літерою F (рис. 1.1, *а*), вимірюється в ньютонх (Н), кілоньютонх (кН), в техніці ж — в меганьютонх (МН).

Розподілена сила по поверхні (рис. 1.1, *б*) — це тиск P , вимірюється в паскалях (Па), частіше — в мегапаскалях (МПа).

Під дією зовнішніх сил тіло (матеріал) деформується, тобто змінюються його розміри і форма (конфігурація).

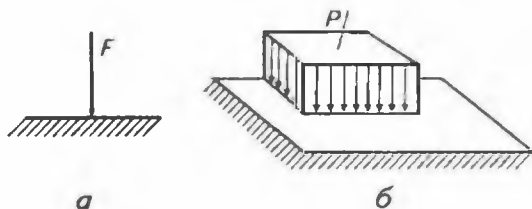


Рис. 1.1

Основні види навантаження:

а — зосереджена сила F (Н); *б* — розподілена сила
по поверхні — тиск P (Н/м²; МН/м²)

Деформація — це зміни форми і розмірів тіла під дією навантаження зовнішніми силами.

1. *Видовження* при розтягуванні або *вкорочення* при стисканні (рис. 1.2, а).

2. *Зсув* або *зріз* (рис. 1.2, б, в).

Деформації позначаються так:

Δl — абсолютне видовження (мм, см);

$\epsilon = \Delta l / l$ — відносне видовження, як відносна величина (без розмірності), або у відсотках (%);

l — початкова довжина стержня;

Δa — абсолютний зсув (мм, см);

$\Delta a / a \approx \gamma$ — відносний зсув або просто кут зсуву.

Деформації бувають пружні і пластичні.

Пружні — це такі, що повністю зникають після усунення зовнішніх сил, що їх спричинили.

Пластичні (або залишкові) — це такі, що не зникають, тобто залишаються після розвантаження.

Виникнення пружних деформацій в матеріалі неодмінно супроводжується появою в ньому напружень.

При навантаженні тіла, тобто при його деформуванні, в ньому виникають сили пружності, додаткові до тих сил взаємодії між атомами, що існують у ненавантаженому тілі.

Напруження — це величина сили пружності, що діє на одиницю площі перерізу тіла.

Отже, напруження є мірою впливу зовнішніх сил (навантажень) на атоми, з яких складається матеріал і які змушені під дією цих сил зближуватись або віддалятись один від одного.

Напруження позначається літерою σ .

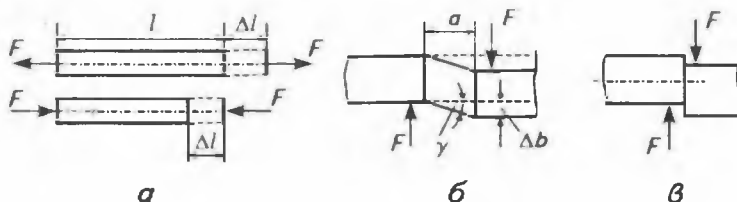


Рис. 1.2

Види деформації:

а — видовження (при розтягуванні) або вкорочення (при стисканні);

б — зсув; в — зріз

У кількісному виразі напруження в заданій точці тіла визначається відношенням сили, або навантаження F , що діє на площинку S довкола цієї точки, до величини цієї площинки. Тобто

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

де F — навантаження; S — площа, на яку, як можна вважати, це навантаження діє.

Відтак напруження вимірюється у Паскалях (Па) або Мегапаскалях (МПа).

Між внутрішніми силами пружності й зовнішнім навантаженням існує рівновага, а саме: зі збільшенням зовнішніх сил збільшуються внутрішні сили пружності (а відтак збільшується напруження σ), але до певної межі, властивої кожному матеріалу. Ця межа називається *границею міцності* й позначається σ_B . Чим більші сили пружності можуть виникнути в матеріалі, тим він міцніший і тим вища границя міцності σ_B .

Визначаються (обчислюються) напруження за допомогою методу перерізів. Тіло подумки розрізується січною площиною на дві частини (рис. 1.3). Одна частина — наприклад права, на рис. 1.3 і 1.4 — відкидається, а її дія на залишену частину замінюється внутрішніми силами пружності (напруженням). При цьому залишена частина під дією прикладених до неї зовнішніх сил F з одного боку і внутрішніх сил пружності в перерізі, що замінюють дію відкинутої частини на залишену (ліву) з іншого боку, має бути в рівновазі.

У найпростішому випадку — при осьовому розтягуванні стержня в його поперечному перерізі (тобто перпендикулярному до осі)

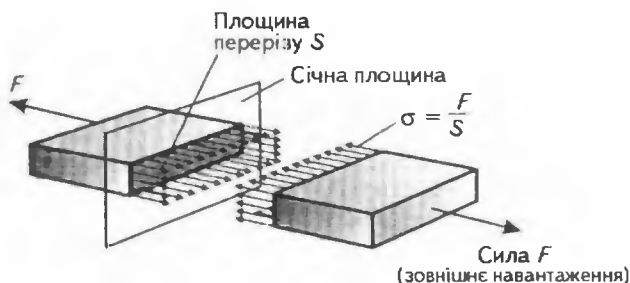


Рис. 1.3
Метод перерізів і напруження σ

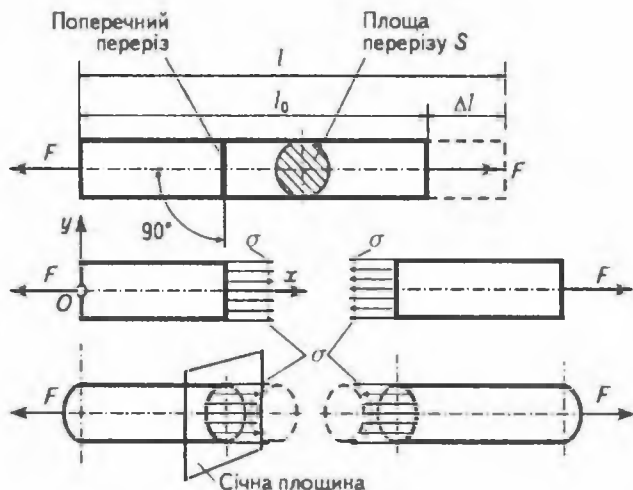


Рис. 1.4

Визначення напруження σ при осьовому розтягуванні

площею S діють напруження σ , рівномірно розподілені по площі перерізу. Оскільки ліва частина розрізаного стержня (або права) під дією зовнішніх сил F і внутрішніх сил (напруження σ) перебуває в рівновазі, то можна записати умову рівноваги. Нагадаємо, що σ діє на одну одиницю площі. Отже, на всю площу S діє сила σS : саме ця рівнодійна сила σS врівноважує зовнішнє навантаження F , так що умова рівноваги має вигляд

$$\sum x_i = 0,$$

тобто

$$F = \sigma S,$$

звідки

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1.1)$$

— це формула для визначення напруження при осьовому розтягуванні (стисканні).

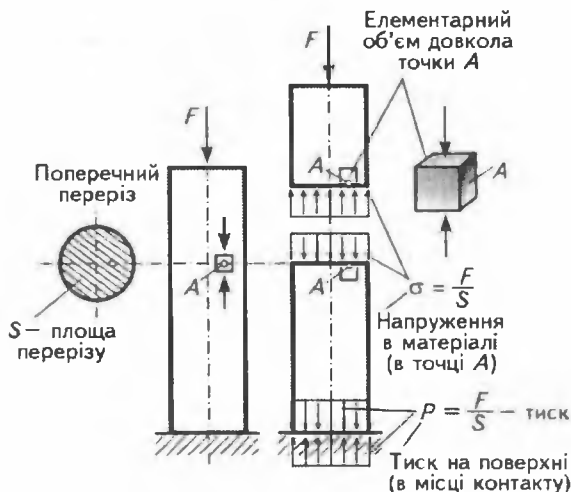


Рис. 1.5
Різниця між навантаженням (силою) F , тиском P та напруженням σ

Напруження, яке діє перпендикулярно (нормально) до площі перерізу, називається *нормальним*. Воно пов'язане з деформацією розтягування або стискання Δl (див. рис. 1.2, а).

! У в а г а. Неприпустимо змішувати поняття: *навантаження* (сила), вимірюється в Н, *тиск* — в Н/м², *напруження* — в Н/м². Хоча в прикладі, наведеному на рис. 1.5, за величиною (F/S) і розмірністю (МПа) тиск P і напруження σ однакові, але фізично вони різні. Тиск P діє ззовні, тобто в місці контакту тіл, а напруження виникає всередині матеріалу — *лише всередині!*

§ 1.2

Жорсткість, міцність, пружність матеріалів

При невеликому навантаженні абсолютне видовження Δl пропорційне навантаженню F , тобто діє відомий з курсу фізики закон Гука:

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}. \quad (1.2)$$

Запишемо його у такому вигляді:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{S} \cdot \frac{1}{E}.$$

Маючи на увазі, що $\frac{\Delta l}{l} = \epsilon$, а $\frac{F}{S} = \sigma$, звідси одержимо закон Гука в іншому вигляді:

$$\sigma = E\epsilon. \quad (1.3)$$

Це означає, що напруження σ і відносна деформація ϵ — пропорційні.

Коефіцієнт пропорційності E в формулі (1.3) називається модулем Юнга. Він характеризує жорсткість матеріалу.

Жорсткість — це властивість матеріалу чинити опір прагненню зовнішніх сил пружно деформувати матеріал. З формули (1.2) видно, що чим більший модуль E , тим меншою є деформація Δl і навпаки: видовження Δl тим більше, чим меншою є жорсткість матеріалу, тобто чим менший модуль E .

Значення модуля E для деяких найхарактерніших матеріалів наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Матеріал	E , МПа	Матеріал	E , МПа
Алмаз	$12,9 \cdot 10^5$	Свинець	$0,17 \cdot 10^5$
Вольфрам	$4,0 \cdot 10^5$	Деревина (повздож волокон)	$1,11 \cdot 10^5$
		Деревина (впоперек волокон)	$0,007 \cdot 10^5$

Закінчення табл. 1.1

Матеріал	E , МПа	Матеріал	E , МПа
Залізо, сталі	$2,0 \cdot 10^5$	Текстоліт	$8,0 \cdot 10^4$
Мідь та її сплави	$1,0 \cdot 10^5$	Гетінакс	$1,6 \cdot 10^4$
		Вініпласт	$3,54 \cdot 10^3$
Золото	$0,8 \cdot 10^5$	Капрон	$1,7 \cdot 10^3$
Алюміній та його сплави	$0,7 \cdot 10^5$	Фторопласт, поліетилен	$7,0 \cdot 10^2$
Скло	$0,56 \cdot 10^5$	Каучук (гуми)	$8,0 \cdot 10^0$

Модуль Юнга

$$E = \sigma / \varepsilon = \operatorname{tg} \alpha \quad (1.4)$$

— це тангенс кута нахилу прямої $0-1$ до осі деформації ε (рис. 1.6, б). Чим більший кут нахилу, тим жорсткіший матеріал.

Міцність матеріалів — це їх здатність витримувати навантаження, не руйнуючись.

Пружність — це здатність матеріалів повністю відновлювати свою форму й розміри після усунення причин, що спричинили деформацію.

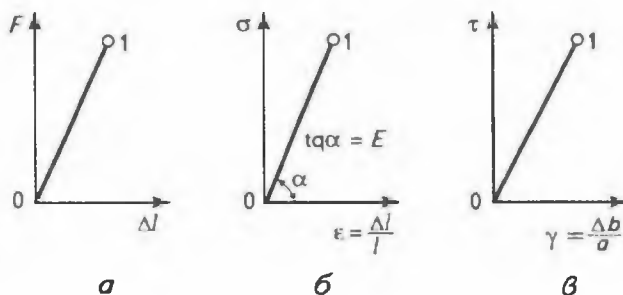


Рис. 1.6

Залежності $F - \Delta l$ (а), $\sigma - \varepsilon$ (б) та $\tau - \gamma$ (в) у межах закону Гука

Характеристики міцності, пружності, так само як і характеристика жорсткості, визначають експериментально при розтягуванні зразка (рис. 1.7, а) круглого поперечного перерізу з робочою частиною завдовжки l_0 , площею перерізу S_0 і двома головками 2 для закріплення в захватах 3. Для цього навантаження (силу F) поступово збільшують, а видовження Δl заміряють і будують діаграму в координатах $F - \Delta l$. Вона характеризує властивості зразка з розмірами: l_0 — довжина і S_0 — площа поперечного перерізу (рис. 1.8, а). Для того щоб мати характеристики матеріалу, незалежні від розмірів зразка чи деталі, діаграму $F - \Delta l$ перебудовують у діаграму $\sigma - \epsilon$, поділивши F на S ($F/S = \sigma$), а Δl на l ($\Delta l/l = \epsilon$). При цьому змінюється лише масштаб діаграми, і характеризує вона *властивості матеріалу*. Таку діаграму для маловуглецевої сталі подано на рис. 1.8, б. На цій діаграмі є декілька характерних ділянок: 0 — 1 — ділянка пропор-

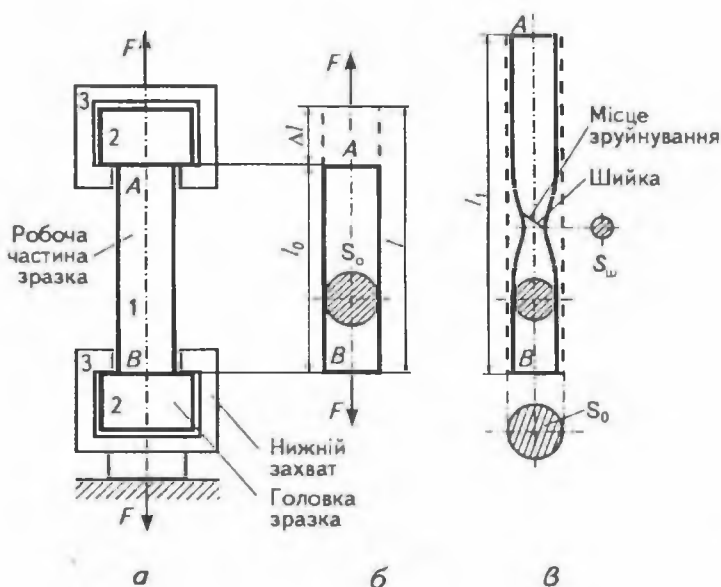


Рис. 1.7

Схема навантаження зразка (а): 1 — $AB = l_0$ — робоча частина зразка до навантаження; 2 — головки; 3 — захвати; поточне (проміжне) деформування (б) та робоча частина зразка після зруйнування (в): l_1 — довжина робочої частини AB після зруйнування

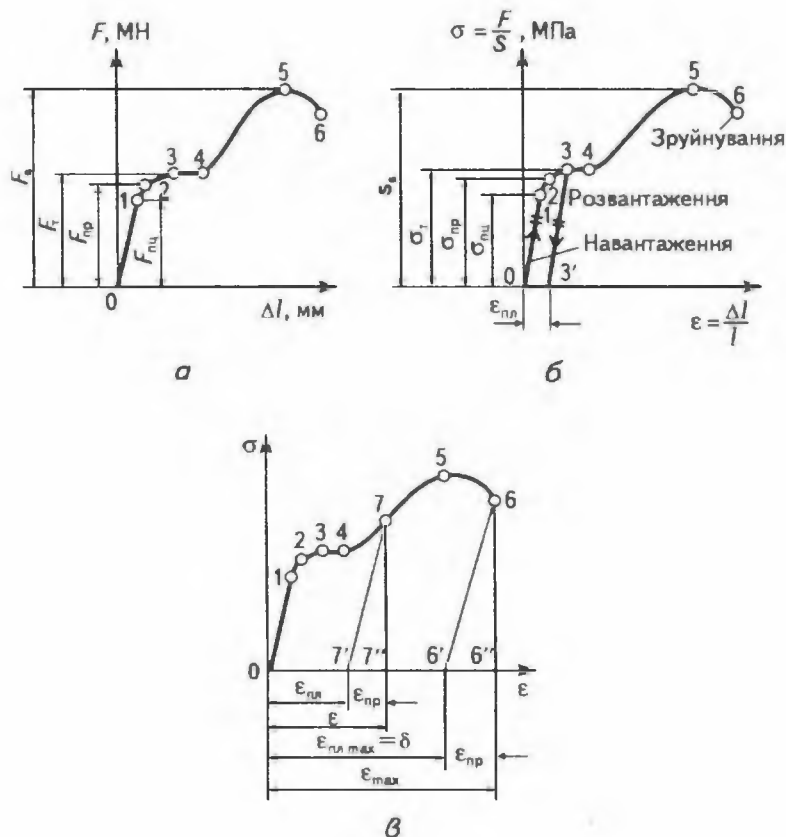


Рис. 1.8

Діаграми розтягу: а — сила F — абсолютне видовження Δl ;
б і в — відповідно напруження σ та відносне видовження ϵ

ційності, тобто ділянка, в межах якої при навантаженні виконується закон Гука: $\sigma = E\epsilon$. Він виконується до певної границі — *границі пропорційності*:

$$\sigma_{пл} = \frac{F_{пл}}{S} \quad (1.5)$$

Це найбільше напруження, при якому ще виконується закон Гука.

При подальшому навантаженні — до точки 2 ($F = F_{пр}$) закон Гука вже не виконується, але деформації ще пружні. Напруження, що

відповідає навантаженню $F_{\text{пр}}$ (точка 2), називається *границею пружності* (див. рис. 1.8, б).

Отже,

$$\sigma_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} / S \quad (1.6)$$

— це найбільше напруження, при якому ще не виникають залишкові (пластичні) деформації (тобто розвантаження відбувається тим самим шляхом 2 — 0, що і навантаження 0 — 2), тому 0 — 2 — це ділянка пружності. При перевищенні $\sigma_{\text{пр}}$, наприклад, при навантаженні до точки 3, розвантаження відбудеться по лінії 3 — 3' (паралельній 0 — 1), тобто виникає залишкова (пластична) деформація $\varepsilon_{\text{пл}}$ (на рис. 1.8, б це 0 — 3').

3 — 4 — ділянка (“площинка”) текучості. Матеріал “тече” — це значить, що деформація збільшується при незмінному навантаженні F_{T} , а відтак при постійному напруженні σ_{T} , що називається *границею текучості*.

Таким чином,

$$\sigma_{\text{T}} = F_{\text{T}} / S \quad (1.7)$$

— це напруження, при якому деформація збільшується за постійного навантаження F (а відтак за постійного напруження σ_{T}).

4 — 5 — ділянка зміцнення, тобто для подальшого зростання деформації потрібне збільшення напруження до точки 5, яка відповідає найбільшому можливому в даному матеріалі напруженню, тобто *границі міцності* $\sigma_{\text{в}}$. Отже,

$$\sigma_{\text{в}} = F_{\text{в}} / S \quad (1.8)$$

— це найбільше напруження, яке може витримати даний матеріал, або таке напруження, що відповідає найбільшому навантаженню $F_{\text{в}}$ до зруйнування. *Не дорівнює, а відповідає!* Бо $\sigma_{\text{в}} = F_{\text{в}} / S$.

5 — 6 — ділянка знеміцнення. Вона закінчується зруйнуванням цязка у точці 6.

Отже, по осі ординат σ діаграми $\sigma - \varepsilon$ можна визначити характеристики трьох властивостей матеріалу: міцності — $\sigma_{\text{в}}$; пружності — $\sigma_{\text{пр}}$; пропорційності — $\sigma_{\text{пц}}$, а також границю текучості — σ_{T} (див. рис. 1.8, б).

§ 1.3

Пластичність та в'язкість

Пластичність — це здатність матеріалів зберігати набуті при деформуванні форму й розміри після усунення причин, що спричинили деформацію. (Це добре видно при деформуванні шматочка пластиліну або вогкої глини.)

При будь-якому напруженні, більшому $\sigma_{\text{пр}}$, наприклад у точці 7, загальна деформація ϵ ($0 - 7''$ на рис. 1.8, в) складається з пружної $\epsilon_{\text{пр}}$ ($7'' - 7'$) і пластичної $\epsilon_{\text{пл}}$ ($0 - 7'$), тобто $\epsilon = \epsilon_{\text{пл}} + \epsilon_{\text{пр}}$ (пряма $7 - 7'$ паралельна прямій $1 - 0$).

Те саме відбувається в момент руйнування — точка б (пряма б — б' також паралельна $1 - 0$). Тобто,

$$\epsilon_{\text{max}} = \epsilon_{\text{пл. max}} + \epsilon_{\text{пр}}.$$

Після зруйнування зразок вже не навантажений, тому пружна частина деформації $\epsilon_{\text{пр}}$ ($б' - б''$) зникає, а пластичне видовження, що залишилось після руйнування, тобто $\epsilon_{\text{пл}}$ ($0 - б'$), позначається літерою δ і називається *відносним залишковим видовженням після руйнування*:

$$\delta = l_1 - l_0 / l_0 \cdot 100 \%,$$

(1.9)

де l_0 — початкова довжина зразка; l — довжина після зруйнування.

Пластичність матеріалу характеризує δ .

При навантаженні (розтягуванні) зразка (див. рис. 1.7) змінюється не лише довжина l , але й поперечні розміри, тобто зменшується площа поперечного перерізу S : до точки 5 (див. рис. 1.8, б) зменшується рівномірно по всій довжині зразка (див. рис. 1.7, в, штрихові лінії) і несуттєво. В точці 5 діаграми $\sigma - \epsilon$ починає утворюватися “шийка” — місцеве суттєве звуження поперечного перерізу. Саме в шийці (див. рис. 1.7, в), тобто при досягненні точки б діаграми $\sigma - \epsilon$, відбувається зруйнування.

Якщо абсолютне залишкове зменшення площі перерізу зразка після зруйнування позначити через ΔS , а відносне $\frac{\Delta S}{S_0}$ — через ψ , то

$$\Delta S/S_0 \cdot 100 \% = (S_0 - S_{\text{ш}})/S_0 \cdot 100 \% = \psi, \quad (1.10)$$

де S_0 — площа перерізу до навантаження; $S_{\text{ш}}$ — площа перерізу шийки після руйнування.

Відносне залишкове зменшення площі перерізу після руйнування ψ — це друга характеристика пластичності, перша — δ .

Отже, характеристик пластичності дві — δ і ψ .

На діаграмі $\sigma - \epsilon$ (див. рис. 1.8) можна побачити δ (це відтинок $0 - b'$); характеристика ψ на діаграмі $\sigma - \epsilon$ відсутня.

! Увага.

1. Не плутати δ і σ , а також значення величин, які вони характеризують: δ — відносне видовження після руйнування, σ — нормальне напруження.

2. Не плутати ϵ і δ : ϵ — це будь-яке поточне значення відносної деформації (відліковується по осі абсцис на діаграмі $\sigma - \epsilon$ від початку координат), $\frac{l-l_0}{l_0} = \epsilon$, а $\delta = \frac{l_1-l_0}{l_0} = \epsilon_{\text{пл. max}}$ — єдине значення для даного матеріалу (див. рис. 1.8, *в*), l — поточне значення довжини зразка (в будь-який момент навантаження); l_1 — довжина зразка після зруйнування; l_0 — початкова довжина (див. рис. 1.7, *б, в*).

Границя міцності та характеристики пластичності для матеріалів, у яких вони суттєво відрізняються, наведено у табл. 1.2.

Матеріали, значення δ і ψ у яких великі, називаються *пластичними*. Навпаки, матеріали, значення δ і ψ у яких незначні (наприклад, сірі чавуни), називаються *крихкими*.

Таблиця 1.2

Матеріал	Границя міцності, σ_b , МПа	Характеристики пластичності	
		δ , %	ψ , %
Сталі	300...1200	6...35	15...65
Залізо (Fe)	150...300	50	80
Вольфрам (W)	1100	0...2,4	0

Отже,

$$\int_0^{\Delta l} dA = \int_0^{\Delta l} F \cdot d\Delta l = A$$

— це повна робота, затрачена на руйнування зразка.

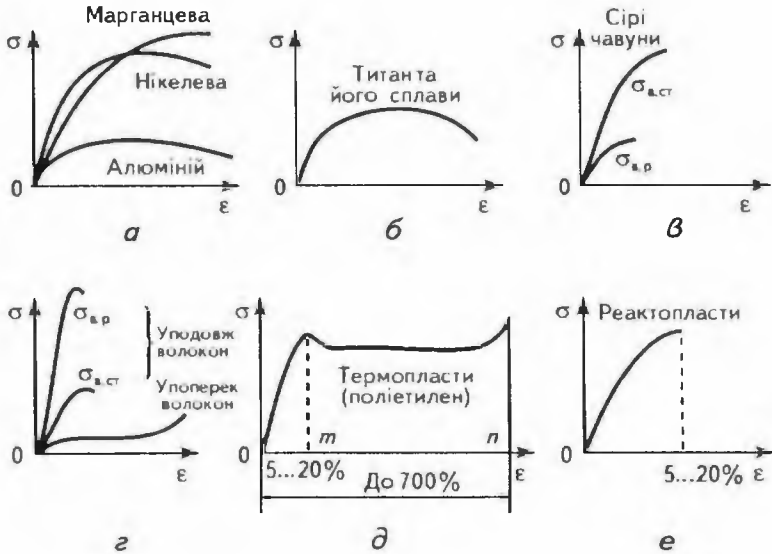


Рис. 1.9

Види діаграм $\sigma - \epsilon$ для різних матеріалів:

a — сталі та алюміній; *б* — титан та його сплави; *в* — сірі чавуни; *г* — деревина;
д — термопласти (поліетилен); *е* — реактопласти

Розділивши повну роботу A на об'єм зразка $V = Sl$, одержимо (змінивши відповідно межі інтегрування) питому роботу руйнування a , тобто роботу, затрачену на руйнування *одиноці об'єму матеріалу*:

$$\int_0^{\Delta l} \frac{F d\Delta l}{V} = \int_0^{\Delta l} \frac{F d\Delta l}{SL} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon = a.$$

Оскільки

$$a = \int \sigma d\epsilon \quad (1.11)$$

— це площа діаграми $\sigma - \epsilon$ (рис. 1.10, б), то питома робота дорівнює площі діаграми $\sigma - \epsilon$ і характеризує енергію, накопичену в одиниці об'єму матеріалу в процесі навантаження до руйнування, тобто характеризує в'язкість матеріалу.

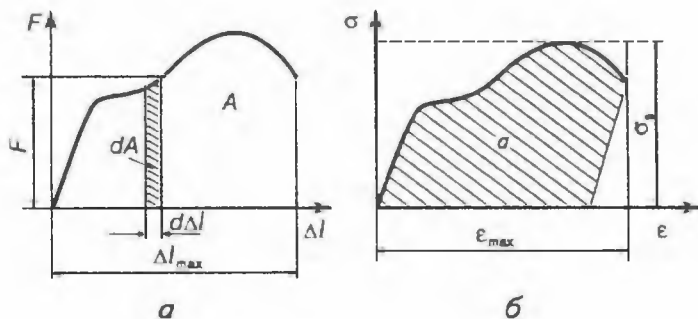


Рис. 1.10

Діаграми розтягу:

$a - F - \Delta l$; $b - \sigma - \epsilon$

Таким чином, **в'язкість** — це здатність матеріалу поглинати (накопичувати) енергію деформування. Вона залежить від міцності (σ_B) і пластичності (δ).

Площу діаграми $\sigma - \epsilon$ можна визначити наближено як площу прямокутника зі сторонами σ_B та ϵ_{max} (див. рис. 1.10, б), а не-заштриховану частину прямокутника врахувати, помноживши добуток $\sigma_B \epsilon$ на коефіцієнт η ($\eta < 0$), тобто

$$a = \sigma_B \epsilon_{max} \eta, \quad (1.12)$$

де η — коефіцієнт повноти діаграми $\sigma - \epsilon$. Для маловуглецевих сталей $\eta = 0,85$.

В.В.Хільчевський, С.Є.Кондратюк, В.О.Степаненко, К.Г.Лопатько

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ

КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



Навчальний посібник

В.В.Хільчевський, С.Є.Кондратюк, В.О.Степаненко, К.Г.Лопатько

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

За редакцією В.О.Степаненка

*Рекомендовано Міністерством
освіти і науки України*

Навчальний посібник
для учнів професійно-технічних
навчальних закладів

*Розповсюдження та тиражування
без офіційного дозволу видавництва заборонено*

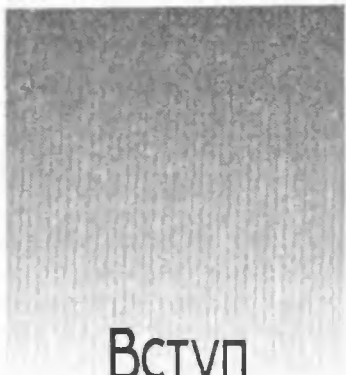
Автори: *В. В. Хільчевський* (гл. 1, 2);
С. Є. Кондратюк (гл. 3—6);
В. О. Степаненко (гл. 7, 9—12);
К. Г. Лопатько (гл. 8)

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. *П. В. Ясній*
(Тернопільський державний технічний університет
ім. І. Пулюя),
С. М. Надуваний
(директор професійно-технічного училища № 4 м. Києва)

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист № 14/18.2—1861 від 17.12.2001 р.)

Редакція літератури з природничих і технічних наук

Редактор *Т. В. Кацовенко*



Вступ

Матеріалознавство

— це прикладна наука, що вивчає будову (структуру) та властивості матеріалів, встановлює зв'язок між їхнім складом, будовою і властивостями, вивчає залежність будови і властивостей від методів виробництва та обробки матеріалів, а також зміну їх під впливом зовнішніх чинників: силових, теплових (термічних), радіаційних та інших.

Технологія

(від грецького *techne* — мистецтво, майстерність, уміння та *logos* — наука, вчення) — це сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей, форми сировини, матеріалу або напівфабриката, що здійснюються в процесі виробництва продукції (виробів). Завдання технології як науки — з'ясування фізичних, хімічних, механічних та інших закономірностей з метою визначення та практичного використання найефективніших і економічних виробничих процесів.

Технологічність

— властивість матеріалу або конструкції, яка дозволяє використати для виробництва, експлуатації та ремонту найбільш економічні технологічні процеси, що забезпечують необхідну якість.

Від *techne* походить також слово техніка.

Техніка

— це сукупність засобів, знарядь, створених людиною для виконання процесів виробництва (машини, апарати, механізми, пристрої, інструменти, прилади тощо).

Отже, технологія — це *способи виробництва*, техніка — це *засоби виробництва*.

Технологія пов'язана з відповідними галузями виробництва: технологія загального машинобудування, літакобудування, виготовлення будь-яких виробів, матеріалів тощо.

Ми ж будемо вивчати матеріалознавство (М) та технологію **конструкційних матеріалів (ТКМ)**.

Конструкційними

називають матеріали, з яких виготовляють деталі машин, приладів, елементи різних конструкцій, інструменти, тобто матеріали, здатні витримувати значні механічні навантаження.

Отже, ТКМ — це наука про сучасні методи одержання та обробки конструкційних матеріалів з метою виготовлення конструкцій і деталей необхідних розмірів, конфігурації, стану (чистоти) поверхні та властивостей.

Основні види обробки конструкційних матеріалів при виготовленні деталей:

- лиття;
- обробка тиском;
- зварювання;
- обробка різанням.

Основні способи обробки матеріалів для надання їм потрібних властивостей:

- термічна обробка (температурна);
- механічна;
- термомеханічна;
- термохімічна.

Рівень технічного розвитку суспільства залежить від того, якими матеріалами воно володіє. Навіть основні етапи розвитку людства визначаються матеріалами (кам'яний вік, бронзовий, вік заліза), що підкреслює важливе місце курсу матеріалознавства серед інших технічних наук.

Курси матеріалознавства і технології взаємопов'язані, оскільки технологія обробки залежить від властивостей оброблюваних матеріалів, а властивості — значною мірою — від методів виробництва матеріалів та їх обробки. В прискоренні науково-технічного поступу важлива роль відводиться машинобудуванню. Сучасне машинобуду-

вання характеризується безперервним зростанням енергонапруженості, екстремальними параметрами (граничні механічні навантаження, високі та низькі температури, агресивні середовища, високий рівень радіації тощо), тому в багатьох випадках тільки надання специфічних властивостей матеріалам, що застосовуються, можна забезпечити надійність і довговічність машин. Нові технології, що пов'язані з використанням надвисоких температур і тиску, лазера, плазми, електропорошкової металургії, енергії вибуху, електро- і магнітоімпульсної обробки тощо, дають змогу одержувати та синтезувати такі матеріали, яких раніше людство не лише не мало, але й не знало, або які взагалі в природному стані не зустрічаються (надтверді, надміцні, жаростійкі тощо).

Отже, завдання матеріалознавства взагалі — це *розробка нових і вдосконалення існуючих матеріалів*. Завдання ж курсу “Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів” як складової частини загальної технологічної підготовки спеціалістів — навчити майбутніх спеціалістів-машинобудівників, як, знаючи силові, температурні та інші умови роботи деталі, визначити необхідні властивості матеріалу й забезпечити їх належним вибором хімічного складу матеріалу деталі, режимів термічної, механічної та інших видів його обробки; у кожному конкретному випадку вибрати і призначити найбільш простий, економічний (дешевий), з мінімумом затрат матеріалу, праці та енергії, по можливості, безвідхідний метод виготовлення деталі чи елемента конструкції.

Крім того, знання основ матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів є конче необхідними для успішного вивчення ряду спеціальних дисциплін, які формують технічну обізнаність, кваліфікацію спеціаліста.

Конструкційні матеріали, що використовуються в машинобудуванні, поділяються на *металеві й неметалеві*.

Металеві: сталі, чавуни та кольорові метали. Залізо і його сплави (сталі, чавуни) — чорні, всі інші — кольорові метали.

Неметалеві: полімери, пластмаси, гуми, деревина, силікатні матеріали — кераміка, скло та ін.

Нині в загальному обсязі застосовуваних конструкційних матеріалів пластмаси становлять дещо більше 5 % (за вагою, а не за асортиментом виготовлюваних виробів). У США вже тепер пластмаси складають більше 15 %, кольорові метали — 30 %. В Україні до недавнього часу частка чорних металів становила більше 90 %.

На цей час виробничі потужності підприємств чорної металургії України становлять по сталі 54 млн т, тобто Україна посідає четверте

місце в світі після Японії, США та Росії, випереджаючи Німеччину, Італію, Францію.

Властивості матеріалів в основному поділяються на фізичні, хімічні, технологічні й механічні.

- *Фізичні*: щільність (питома вага), тепло- й електропровідність, магнетизм та деякі інші.
- *Хімічні*: здатність взаємодіяти з довколишнім середовищем, вступати в хімічні сполучення, розчинятися, кородувати, більшою чи меншою мірою чинити опір дії агресивних середовищ.
- *Технологічні*: здатність піддаватися різним методам обробки — різанню (точіння, фрезерування, шліфування та інші), обробці тиском (прокатування, штампування, пресування, волочіння, кування), зварюванню, литтю (рідкотекучість, усадка).
- *Механічні*: твердість, міцність, жорсткість, пружність, пластичність, крихкість, зносостійкість, в'язкість, втомна міцність, жаростійкість, жароміцність, зносостійкість, дисипація енергії, повзучість та деякі інші. Ці властивості буде детально розглянуто далі, бо саме їм приділена основна увага в цьому посібнику.

Механічні властивості матеріалів та їхні характеристики



Глава 1

Основні механічні властивості матеріалів та їхні характеристики

§ 1.1

Навантаження, деформація, напруження

Механічні властивості матеріалів пов'язані з поняттям про навантаження, деформацію та напруження.

Навантаження — це зовнішні сили, що прикладаються до тіла (матеріалу). Вони бувають зосереджені або розподілені по довжині, поверхні та об'єму (рис. 1.1).

Зосереджена сила позначається літерою F (рис. 1.1, *а*), вимірюється в ньютонх (Н), кілоньютонх (кН), в техніці ж — в меганьютонх (МН).

Розподілена сила по поверхні (рис. 1.1, *б*) — це тиск P , вимірюється в паскалях (Па), частіше — в мегапаскалях (МПа).

Під дією зовнішніх сил тіло (матеріал) деформується, тобто змінюються його розміри і форма (конфігурація).

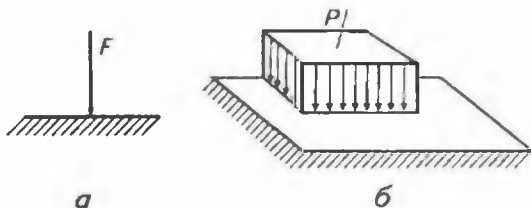


Рис. 1.1

Основні види навантаження:

а — зосереджена сила F (Н); *б* — розподілена сила по поверхні — тиск P (Н/м²; МН/м²)

Деформація — це зміни форми і розмірів тіла під дією навантаження зовнішніми силами.

1. *Видовження* при розтягуванні або *вкорочення* при стисканні (рис. 1.2, а).

2. *Зсув* або *зріз* (рис. 1.2, б, в).

Деформації позначаються так:

Δl — абсолютне видовження (мм, см);

$\epsilon = \Delta l / l$ — відносне видовження, як відносна величина (без розмірності), або у відсотках (%);

l — початкова довжина стержня;

Δa — абсолютний зсув (мм, см);

$\Delta a / a \approx \gamma$ — відносний зсув або просто кут зсуву.

Деформації бувають пружні і пластичні.

Пружні — це такі, що повністю зникають після усунення зовнішніх сил, що їх спричинили.

Пластичні (або залишкові) — це такі, що не зникають, тобто залишаються після розвантаження.

Виникнення пружних деформацій в матеріалі неодмінно супроводжується появою в ньому напружень.

При навантаженні тіла, тобто при його деформуванні, в ньому виникають сили пружності, додаткові до тих сил взаємодії між атомами, що існують у ненавантаженому тілі.

Напруження — це величина сили пружності, що діє на одиницю площі перерізу тіла.

Отже, напруження є мірою впливу зовнішніх сил (навантажень) на атоми, з яких складається матеріал і які змушені під дією цих сил зближуватись або віддалятись один від одного.

Напруження позначається літерою σ .

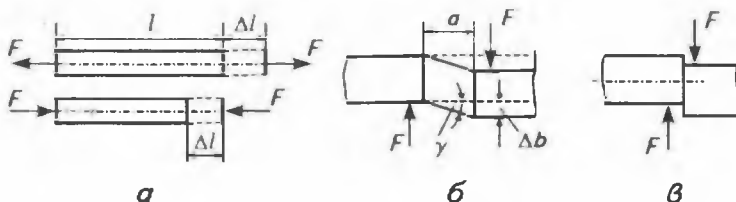


Рис. 1.2

Види деформації:

а — видовження (при розтягуванні) або вкорочення (при стисканні);

б — зсув; в — зріз

У кількісному виразі напруження в заданій точці тіла визначається відношенням сили, або навантаження F , що діє на площинку S довкола цієї точки, до величини цієї площинки. Тобто

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

де F — навантаження; S — площа, на яку, як можна вважати, це навантаження діє.

Відтак напруження вимірюється у Паскалях (Па) або Мегапаскалях (МПа).

Між внутрішніми силами пружності й зовнішнім навантаженням існує рівновага, а саме: зі збільшенням зовнішніх сил збільшуються внутрішні сили пружності (а відтак збільшується напруження σ), але до певної межі, властивої кожному матеріалу. Ця межа називається *границею міцності* й позначається σ_b . Чим більші сили пружності можуть виникнути в матеріалі, тим він міцніший і тим вища границя міцності σ_b .

Визначаються (обчислюються) напруження за допомогою методу перерізів. Тіло подумки розрізується січною площиною на дві частини (рис. 1.3). Одна частина — наприклад права, на рис. 1.3 і 1.4 — відкидається, а її дія на залишену частину замінюється внутрішніми силами пружності (напруженням). При цьому залишена частина під дією прикладених до неї зовнішніх сил F з одного боку і внутрішніх сил пружності в перерізі, що замінюють дію відкинутої частини на залишену (ліву) з іншого боку, має бути в рівновазі.

У найпростішому випадку — при осьовому розтягуванні стержня в його поперечному перерізі (тобто перпендикулярному до осі)

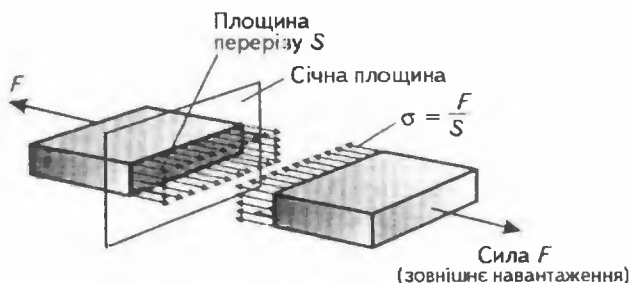


Рис. 1.3
Метод перерізів і напруження σ

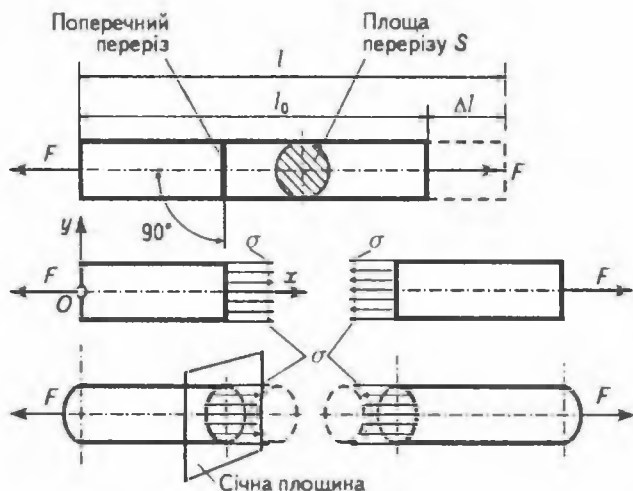


Рис. 1.4

Визначення напруження σ при осьовому розтягуванні

площею S діють напруження σ , рівномірно розподілені по площі перерізу. Оскільки ліва частина розрізаного стержня (або права) під дією зовнішніх сил F і внутрішніх сил (напруження σ) перебуває в рівновазі, то можна записати умову рівноваги. Нагадаємо, що σ діє на одну одиницю площі. Отже, на всю площу S діє сила σS : саме ця рівнодійна сила σS врівноважує зовнішнє навантаження F , так що умова рівноваги має вигляд

$$\sum x_i = 0,$$

тобто

$$F = \sigma S,$$

звідки

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1.1)$$

— це формула для визначення напруження при осьовому розтягуванні (стисканні).

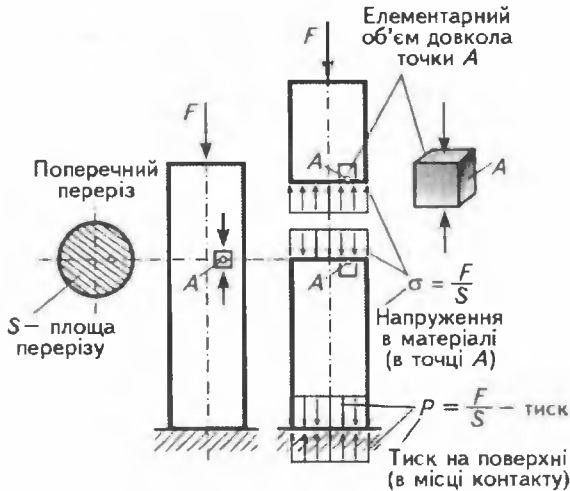


Рис. 1.5

Різниця між навантаженням (силою) F , тиском P та напруженням σ

Напруження, яке діє перпендикулярно (нормально) до площі перерізу, називається *нормальним*. Воно пов'язане з деформацією розтягування або стискання Δl (див. рис. 1.2, а).

! У в а г а. Неприпустимо змішувати поняття: *навантаження* (сила), вимірюється в Н, *тиск* — в Н/м², *напруження* — в Н/м². Хоча в прикладі, наведеному на рис. 1.5, за величиною (F/S) і розмірністю (МПа) тиск P і напруження σ однакові, але фізично вони різні. Тиск P діє ззовні, тобто в місці контакту тіл, а напруження виникає всередині матеріалу — *лише всередині!*

§ 1.2

Жорсткість, міцність, пружність матеріалів

При невеликому навантаженні абсолютне видовження Δl пропорційне навантаженню F , тобто діє відомий з курсу фізики закон Гука:

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}. \quad (1.2)$$

Запишемо його у такому вигляді:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{S} \cdot \frac{1}{E}.$$

Маючи на увазі, що $\frac{\Delta l}{l} = \epsilon$, а $\frac{F}{S} = \sigma$, звідси одержимо закон Гука в іншому вигляді:

$$\sigma = E\epsilon. \quad (1.3)$$

Це означає, що напруження σ і відносна деформація ϵ — пропорційні.

Коефіцієнт пропорційності E в формулі (1.3) називається модулем Юнга. Він характеризує жорсткість матеріалу.

Жорсткість — це властивість матеріалу чинити опір прагненню зовнішніх сил пружно деформувати матеріал. З формули (1.2) видно, що чим більший модуль E , тим меншою є деформація Δl і навпаки: видовження Δl тим більше, чим меншою є жорсткість матеріалу, тобто чим менший модуль E .

Значення модуля E для деяких найхарактерніших матеріалів наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Матеріал	E , МПа	Матеріал	E , МПа
Алмаз	$12,9 \cdot 10^5$	Свинець	$0,17 \cdot 10^5$
Вольфрам	$4,0 \cdot 10^5$	Деревина (повздож волокон)	$1,11 \cdot 10^5$
		Деревина (впоперек волокон)	$0,007 \cdot 10^5$

Закінчення табл. 1.1

Матеріал	E , МПа	Матеріал	E , МПа
Залізо, сталі	$2,0 \cdot 10^5$	Текстоліт	$8,0 \cdot 10^4$
Мідь та її сплави	$1,0 \cdot 10^5$	Гетінакс	$1,6 \cdot 10^4$
		Вініпласт	$3,54 \cdot 10^3$
Золото	$0,8 \cdot 10^5$	Капрон	$1,7 \cdot 10^3$
Алюміній та його сплави	$0,7 \cdot 10^5$	Фторопласт, поліетилен	$7,0 \cdot 10^2$
Скло	$0,56 \cdot 10^5$	Каучук (гуми)	$8,0 \cdot 10^0$

Модуль Юнга

$$E = \sigma / \epsilon = \operatorname{tg} \alpha \quad (1.4)$$

— це тангенс кута нахилу прямої $0-1$ до осі деформації ϵ (рис. 1.6, б). Чим більший кут нахилу, тим жорсткіший матеріал.

Міцність матеріалів — це їх здатність витримувати навантаження, не руйнуючись.

Пружність — це здатність матеріалів повністю відновлювати свою форму й розміри після усунення причин, що спричинили деформацію.

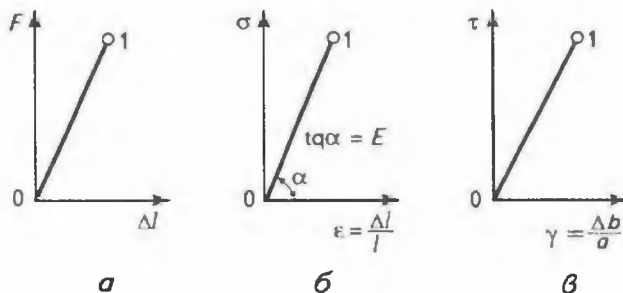


Рис. 1.6

Залежності $F - \Delta l$ (а), $\sigma - \epsilon$ (б) та $\tau - \gamma$ (в) у межах закону Гука

Характеристики міцності, пружності, так само як і характеристика жорсткості, визначають експериментально при розтягуванні зразка (рис. 1.7, а) круглого поперечного перерізу з робочою частиною завдовжки l_0 , площею перерізу S_0 і двома головками 2 для закріплення в захватах 3. Для цього навантаження (силу F) поступово збільшують, а видовження Δl заміряють і будують діаграму в координатах $F - \Delta l$. Вона характеризує властивості зразка з розмірами: l_0 — довжина і S_0 — площа поперечного перерізу (рис. 1.8, а). Для того щоб мати характеристики матеріалу, незалежні від розмірів зразка чи деталі, діаграму $F - \Delta l$ перебудовують у діаграму $\sigma - \epsilon$, поділивши F на S ($F/S = \sigma$), а Δl на l ($\Delta l/l = \epsilon$). При цьому змінюється лише масштаб діаграми, і характеризує вона *властивості матеріалу*. Таку діаграму для маловуглецевої сталі подано на рис. 1.8, б. На цій діаграмі є декілька характерних ділянок: 0 — 1 — ділянка пропор-

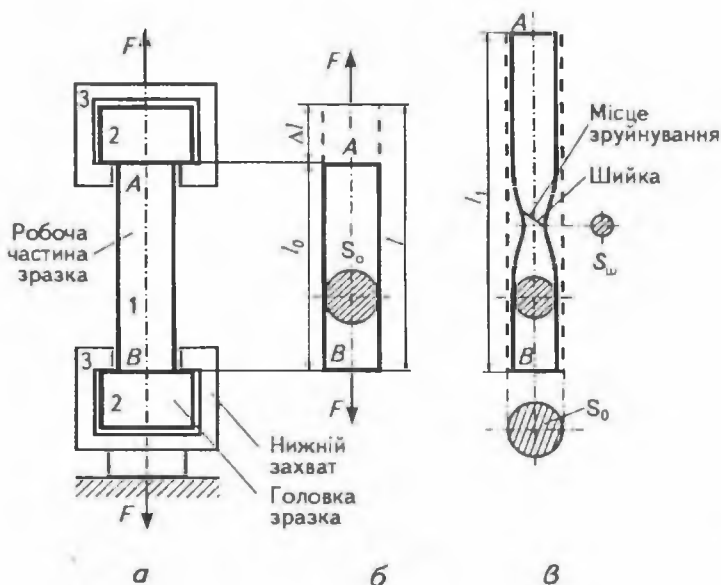


Рис. 1.7

Схема навантаження зразка (а): 1 — $AB = l_0$ — робоча частина зразка до навантаження; 2 — головки; 3 — захвати; поточне (проміжне) деформування (б) та робоча частина зразка після зруйнування (в): l_1 — довжина робочої частини AB після зруйнування

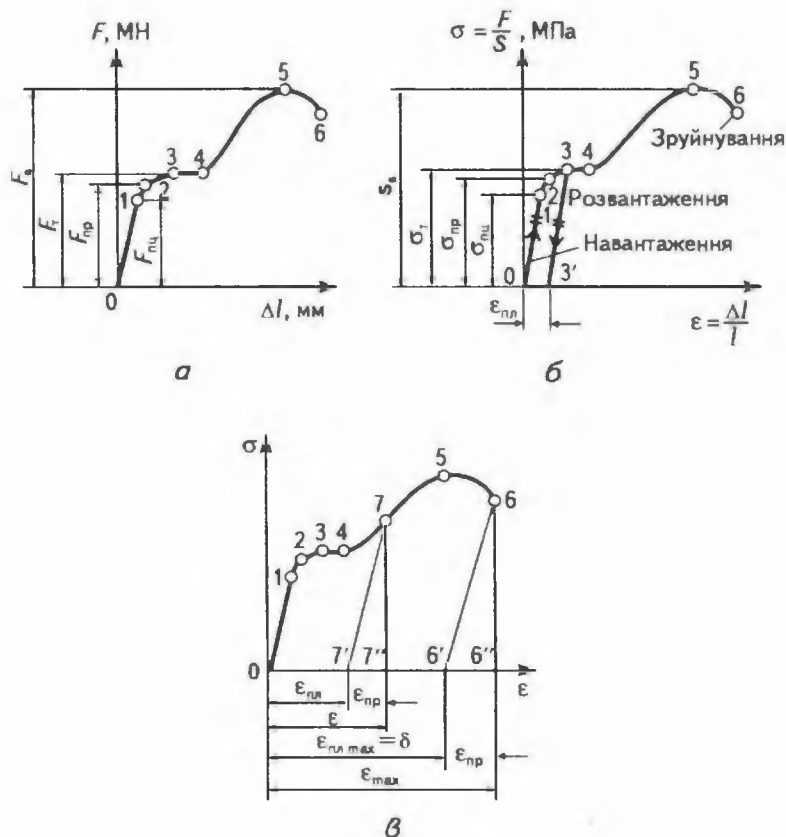


Рис. 1.8

Діаграми розтягу: a — сила F — абсолютне видовження Δl ;
 $б$ і $в$ — відповідно напруження σ та відносне видовження ϵ

ційності, тобто ділянка, в межах якої при навантаженні виконується закон Гука: $\sigma = E\epsilon$. Він виконується до певної границі — *границі пропорційності*:

$$\sigma_{пл} = \frac{F_{пл}}{S} \quad (1.5)$$

Це найбільше напруження, при якому ще виконується закон Гука.

При подальшому навантаженні — до точки 2 ($F = F_{пр}$) закон Гука вже не виконується, але деформації ще пружні. Напруження, що

відповідає навантаженню $F_{\text{пр}}$ (точка 2), називається *границею пружності* (див. рис. 1.8, б).

Отже,

$$\sigma_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} / S \quad (1.6)$$

— це найбільше напруження, при якому ще не виникають залишкові (пластичні) деформації (тобто розвантаження відбувається тим самим шляхом 2 — 0, що і навантаження 0 — 2), тому 0 — 2 — це ділянка пружності. При перевищенні $\sigma_{\text{пр}}$, наприклад, при навантаженні до точки 3, розвантаження відбудеться по лінії 3 — 3' (паралельній 0 — 1), тобто виникає залишкова (пластична) деформація $\epsilon_{\text{пл}}$ (на рис. 1.8, б це 0 — 3').

3 — 4 — ділянка (“площинка”) текучості. Матеріал “тече” — це значить, що деформація збільшується при незмінному навантаженні F_{T} , а відтак при постійному напруженні σ_{T} , що називається *границею текучості*.

Таким чином,

$$\sigma_{\text{T}} = F_{\text{T}} / S \quad (1.7)$$

— це напруження, при якому деформація збільшується за постійного навантаження F (а відтак за постійного напруження σ_{T}).

4 — 5 — ділянка зміцнення, тобто для подальшого зростання деформації потрібне збільшення напруження до точки 5, яка відповідає найбільшому можливому в даному матеріалі напруженню, тобто *границі міцності* $\sigma_{\text{в}}$. Отже,

$$\sigma_{\text{в}} = F_{\text{в}} / S \quad (1.8)$$

— це найбільше напруження, яке може витримати даний матеріал, або таке напруження, що відповідає найбільшому навантаженню $F_{\text{в}}$ до зруйнування. *Не дорівнює, а відповідає!* Бо $\sigma_{\text{в}} = F_{\text{в}} / S$.

5 — 6 — ділянка знеміцнення. Вона закінчується зруйнуванням цязка у точці 6.

Отже, по осі ординат σ діаграми $\sigma - \epsilon$ можна визначити характеристики трьох властивостей матеріалу: міцності — $\sigma_{\text{в}}$; пружності — $\sigma_{\text{пр}}$; пропорційності — $\sigma_{\text{пц}}$, а також границю текучості — σ_{T} (див. рис. 1.8, б).

§ 1.3

Пластичність та в'язкість

Пластичність — це здатність матеріалів зберігати набуті при деформуванні форму й розміри після усунення причин, що спричинили деформацію. (Це добре видно при деформуванні шматочка пластиліну або вогкої глини.)

При будь-якому напруженні, більшому $\sigma_{\text{пр}}$, наприклад у точці 7, загальна деформація ϵ ($0 - 7''$ на рис. 1.8, *в*) складається з пружної $\epsilon_{\text{пр}}$ ($7' - 7''$) і пластичної $\epsilon_{\text{пл}}$ ($0 - 7'$), тобто $\epsilon = \epsilon_{\text{пл}} + \epsilon_{\text{пр}}$ (пряма $7 - 7'$ паралельна прямій $1 - 0$).

Те саме відбувається в момент руйнування — точка *б* (пряма $б - б'$ також паралельна $1 - 0$). Тобто,

$$\epsilon_{\text{max}} = \epsilon_{\text{пл. max}} + \epsilon_{\text{пр}}.$$

Після зруйнування зразок вже не навантажений, тому пружна частина деформації $\epsilon_{\text{пр}}$ ($б' - б''$) зникає, а пластичне видовження, що залишилось після руйнування, тобто $\epsilon_{\text{пл}}$ ($0 - б'$), позначається літерою δ і називається *відносним залишковим видовженням після руйнування*:

$$\delta = l_1 - l_0 / l_0 \cdot 100 \%,$$

(1.9)

де l_0 — початкова довжина зразка; l — довжина після зруйнування.

Пластичність матеріалу характеризує δ .

При навантаженні (розтягуванні) зразка (див. рис. 1.7) змінюється не лише довжина l , але й поперечні розміри, тобто зменшується площа поперечного перерізу S : до точки 5 (див. рис. 1.8, *б*) зменшується рівномірно по всій довжині зразка (див. рис. 1.7, *в*, штрихові лінії) і несуттєво. В точці 5 діаграми $\sigma - \epsilon$ починає утворюватися “шийка” — місцеве суттєве звуження поперечного перерізу. Саме в шийці (див. рис. 1.7, *в*), тобто при досягненні точки *б* діаграми $\sigma - \epsilon$, відбувається зруйнування.

Якщо абсолютне залишкове зменшення площі перерізу зразка після зруйнування позначити через ΔS , а відносне $\frac{\Delta S}{S_0}$ — через ψ , то

$$\Delta S/S_0 \cdot 100 \% = (S_0 - S_{\text{ш}})/S_0 \cdot 100 \% = \psi, \quad (1.10)$$

де S_0 — площа перерізу до навантаження; $S_{\text{ш}}$ — площа перерізу шийки після руйнування.

Відносне залишкове зменшення площі перерізу після руйнування ψ — це друга характеристика пластичності, перша — δ .

Отже, характеристик пластичності дві — δ і ψ .

На діаграмі $\sigma - \epsilon$ (див. рис. 1.8) можна побачити δ (це відтинок 0 — б'); характеристика ψ на діаграмі $\sigma - \epsilon$ відсутня.

! Увага.

1. Не плутати δ і σ , а також значення величин, які вони характеризують: δ — відносне видовження після руйнування, σ — нормальне напруження.

2. Не плутати ϵ і δ : ϵ — це будь-яке поточне значення відносної деформації (відліковується по осі абсцис на діаграмі $\sigma - \epsilon$ від початку координат), $\frac{l-l_0}{l_0} = \epsilon$, а $\delta = \frac{l_1-l_0}{l_0} = \epsilon_{\text{пл. max}}$ — єдине значення для даного матеріалу (див. рис. 1.8, в), l — поточне значення довжини зразка (в будь-який момент навантаження); l_1 — довжина зразка після зруйнування; l_0 — початкова довжина (див. рис. 1.7, б, в).

Границя міцності та характеристики пластичності для матеріалів, у яких вони суттєво відрізняються, наведено у табл. 1.2.

Матеріали, значення δ і ψ у яких великі, називаються *пластичними*. Навпаки, матеріали, значення δ і ψ у яких незначні (наприклад, сірі чавуни), називаються *крихкими*.

Таблиця 1.2

Матеріал	Границя міцності, σ_b , МПа	Характеристики пластичності	
		δ , %	ψ , %
Сталі	300...1200	6...35	15...65
Залізо (Fe)	150...300	50	80
Вольфрам (W)	1100	0...2,4	0

Закінчення табл. 1.2

Матеріал	Границя міцності, σ_b , МПа	Характеристики пластичності	
		δ , %	ψ , %
Золото	100...140	30...50	90...95
Свинець (Pb)	10...15	70	100
Титанові сплави	700...1100	8...12	—
Латуні	320	55	—
Бронзи, мідь	380	65	—
Алюмінієвий сплав (АМГ)	130...190	15...23	—
Чавуни сірі	120...440	0,45...0,5	≈ 0

Якщо $\psi = 0$ або близько 0, то це свідчить, що руйнування відбувається за відсутності шийки (тобто матеріал дуже крихкий).

Діаграми $\sigma - \epsilon$ для кольорових металів та їхніх сплавів, для полімерів, композитів, навіть для деяких сталей можуть суттєво відрізнятися від діаграми для м'якої маловуглецевої сталі (див. рис. 1.8, б). Діаграми для деяких матеріалів наведено на рис. 1.9.

Отже, в одних матеріалах суттєво розвинута ділянка пропорційності 0 — 1, наприклад дерева при розтягуванні (рис. 1.9, з). В інших, навпаки, — вже при невеликих напруженнях і деформаціях залежність $\sigma - \epsilon$ стає нелінійною, тобто закон Гука $\sigma = E\epsilon$ порушується, але пружність зберігається (нелінійно-пружний матеріал, рис. 1.9, б). У цих випадках визначають умовну границю пропорційності, умовну границю пружності, а при відсутності на діаграмі площинки текучості (ділянка текучості 3 — 4 на рис. 1.7, б) — умовну границю текучості.

Умовна границя текучості — це напруження, при якому відносна залишкова деформація дорівнює 0,2 %. Позначається умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$.

Текучість на ділянці $m - n$ у термопластів (наприклад, поліетилен, рис. 1.9, д) відображує розвиток шийки по всій довжині зразка (на відміну від металів, у яких шийка локалізується в одному місці, див. рис. 1.7, в).

Якщо на діаграмі $F - \Delta l$ (рис. 1.10, а) виокремити елементарну площинку завдовжки $d\Delta l$, то площа $dA = F \cdot d\Delta l$ — це елементарна робота.

Отже,

$$\int_0^{\Delta l} dA = \int_0^{\Delta l} F \cdot d\Delta l = A$$

— це повна робота, затрачена на руйнування зразка.

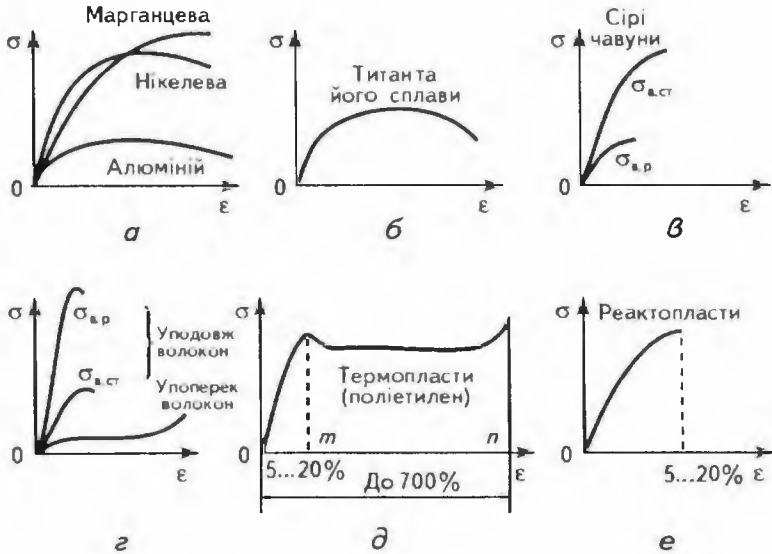


Рис. 1.9

Види діаграм $\sigma - \epsilon$ для різних матеріалів:

а — сталі та алюміній; б — титан та його сплави; в — сірі чавуни; г — деревина;
д — термопласти (поліетилен); е — реактопласти

Розділивши повну роботу A на об'єм зразка $V = Sl$, одержимо (змінюючи відповідно межі інтегрування) питому роботу руйнування a , тобто роботу, затрачену на руйнування *одиниці об'єму матеріалу*:

$$\int_0^{\Delta l} \frac{F d\Delta l}{V} = \int_0^{\Delta l} \frac{F d\Delta l}{SL} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon = a.$$

Оскільки

$$a = \int \sigma d\epsilon \quad (1.11)$$

— це площа діаграми $\sigma - \epsilon$ (рис. 1.10, б), то питома робота дорівнює площі діаграми $\sigma - \epsilon$ і характеризує енергію, накопичену в одиниці об'єму матеріалу в процесі навантаження до руйнування, тобто характеризує в'язкість матеріалу.

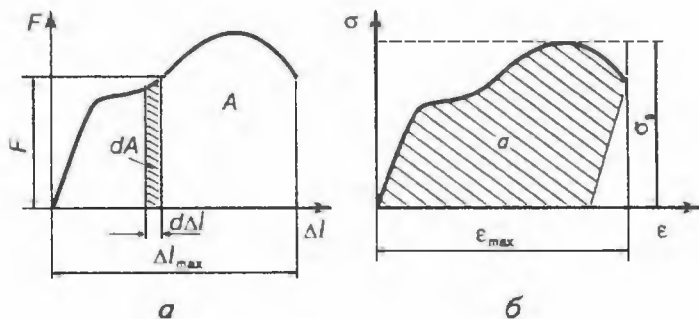


Рис. 1.10

Діаграми розтягу:

а — $F - \Delta l$; б — $\sigma - \epsilon$

Таким чином, **в'язкість** — це здатність матеріалу поглинати (накопичувати) енергію деформування. Вона залежить від міцності (σ_B) і пластичності (δ).

Площу діаграми $\sigma - \epsilon$ можна визначити наближено як площу прямокутника зі сторонами σ_B та ϵ_{max} (див. рис. 1.10, б), а не-заштриховану частину прямокутника врахувати, помноживши добуток $\sigma_B \epsilon$ на коефіцієнт η ($\eta < 0$), тобто

$$a = \sigma_B \epsilon_{max} \eta, \quad (1.12)$$

де η — коефіцієнт повноти діаграми $\sigma - \epsilon$. Для маловуглецевих сталей $\eta = 0,85$.

§ 1.4

Основні відмінності між пластичними й крихкими матеріалами

• Пластичні матеріали руйнуються зі значними залишковими (пластичними) деформаціями, а крихкі — без помітних залишкових деформацій (без шийки), наприклад:

для сталей $\delta = 6...35\%$; $\psi = 15...65\%$;

для сірих чавунів $\delta = 0,1...0,5\%$; $\psi = 0$.

Вважається, якщо $\delta < 5\%$, то матеріал крихкий, а якщо $\delta > 5\%$ — пластичний.

• Пластичні матеріали чинять однаковий опір розтягуванню й стисканню. У крихких же матеріалів опір розтягуванню ($\sigma_{в.р.}$) значно менший за опір стисканню ($\sigma_{в.ст.}$). Наприклад сірі чавуни (див. рис. 1.9, в):

$\sigma_{в.р.} = 120...440$ МПа;

$\sigma_{в.ст.} = 600...1200$ МПа.

У полімерів, пластмас, композитів різниця між $\sigma_{в.р.}$ та $\sigma_{в.ст.}$ — несуттєва.

У більшості пластмас $\sigma_{в.р.} \approx \sigma_{в.ст.}$.

Одначе є матеріали, які руйнуванню при розтягуванні чинять опір більше, ніж при стисканні, наприклад сосна, дуб. У деревно-шаруватих пластиках $\sigma_{в.р.} > \sigma_{в.ст.}$.

Границі міцності для деяких матеріалів наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Матеріал	Границя міцності $\sigma_{в.}$, МПа	
	при розтягуванні	при стисканні
Чавуни сірі	120...440	600...1400
Скло	30...100	500...2000
Граніт	2...3	120...160
Цегла	1...2,5	5...30
Бетони	0,85...10	7,5...43
Поліетилен	22...40	28...40
Мінпласт	40...60	80...160
Текстоліт	50...100	120...250

Закінчення табл. 1.3

Матеріал	Границя міцності σ_b , МПа	
	при розтягуванні	при стисканні
Гетінакс	60...100	150...180
Склопластик	260...400	100...300
Сосна (повздож волокон)	80	40
Дуб (повздож волокон)	95	50

• Крихкі матеріали поведуться гірше ніж пластичні (мають меншу несучу здатність) при наявності концентрації напружень. *Концентрація напруження* — це різке підвищення напружень у невеликих об'ємах матеріалу біля концентраторів напружень, тобто місць різкої зміни конфігурації (або розмірів) деталі: гострі надрізи, виточки, невеликі отвори, тріщини тощо (рис. 1.11).

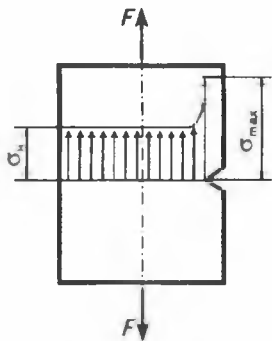


Рис. 1.11

Графік (епюра) розподілу σ в поперечному перерізі за наявності концентратора напружень

Схильність матеріалів до концентрації напруження характеризується коефіцієнтом концентрації α :

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n},$$

де $\sigma_n = F/S$ — номінальне (розрахункове) напруження;

$\sigma_{\max}$ — напруження біля “дна” концентратора.

Залежно від гостроти концентратора $\alpha = 1,1 \dots 3,0$ (5,0).

Якщо матеріал пластичний (має площинку текучості) і $\sigma_{\max}$ досягає границі текучості σ_T ($\sigma_{\max} = \sigma_T$), то матеріал біля концентратора

“тече”, $\sigma_{\max}$ не збільшується, а відтак навантаження F можна підвищувати доки σ_n досягне $\sigma_{\max}$, тобто σ_T . Отже, матеріал конструкції використовується більш раціонально (підвищується несуча здатність конструкції). У крихкого матеріалу це не відбувається, а тому, якщо $\sigma_{\max}$ в місці концентрації досягає границі міцності σ_B , тоді відбувається руйнування. Наявність концентраторів небажана і в інших матеріалах.

Тобто природа не любить гострих кутів.

Зменшити концентрацію α можна: раціональним проектуванням, уникаючи гострих кутів, скруглюючи їх, де це можливо, роблячи, наприклад, галтелі (рис. 1.12). При певному радіусі галтелі r і певній її конфігурації концентрації напружень можна уникнути зовсім, тобто досягти $\alpha = 1$, а також добираючи матеріал, менш чутливий до концентрації напруження.



Рис. 1.12

Галтелі для зменшення концентрації напружень

- Крихкі матеріали чинять менший опір ударним навантаженням, ніж пластичні.

Здатність матеріалів чинити опір ударним навантаженням характеризує ударна в'язкість.

Ударна в'язкість — це відношення роботи A (МДж), затраченої на руйнування, до площі перерізу S (м²) в місці руйнування. Найчастіше ударна в'язкість визначається випробуванням на згин зразків з надрізом (з концентратором, рис. 1.13); позначається ударна в'язкість

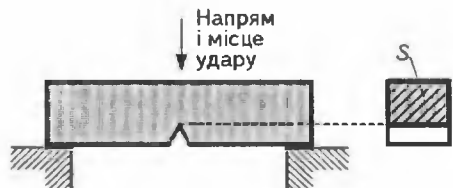


Рис. 1.13

Зразок для визначення ударної в'язкості

a_H або згідно зі стандартами — через KCT, KCU, KCV, де остання літера відповідає формі концентратора, тобто надрізу. Наприклад, на рис. 1.13 є гострий надріз, а тому a_H — це KCV.

Отже,

$$a_H = \frac{A}{S}. \quad (1.13)$$

Визначається a_H експериментально на установках, що називаються *копрами*.

Для сталей $a_H = (0,2 \dots 2) \text{ МДж/м}^2$.

Для заліза $a_H = 3,0 \text{ МДж/м}^2$.

Для сірих чавунів $a_H = (0,01 \dots 0,04) \text{ МДж/м}^2$.

Пластмаси мають низьку ударну в'язкість.

§ 1.5

Поняття про умову міцності

Руйнування деталей машин, механізмів, елементів конструкцій майже завжди призводить до втрати матеріальних цінностей, каліцтва або загибелі людей. Щоб уникнути цього (а відтак і відповідальності за наслідки), розрахунки на міцність необхідно робити, дотримуючись **умови міцності**: найбільші напруження $\sigma_{\max}$, що можуть виникнути в деталі, мають бути меншими не лише від границі міцності σ_B , а й від границі текучості σ_T (якщо треба уникнути зовсім пластичних деформацій) і навіть границі пружності $\sigma_{\text{пр}}$. Умова міцності в загальному вигляді записується так:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]. \quad (1.14)$$

Наприклад, при осьовому розтягуванні, $\sigma_{\max} = F_{\max}/S$ (див. рис. 1.4, формула (1.1)), тоді

$$\sigma_{\max} = F_{\max}/S \leq [\sigma], \quad (1.15)$$

де $[\sigma]$ — допустиме напруження, що визначається як

$$[\sigma] = \sigma_B / n_\sigma, \quad (1.16)$$

n_σ — запас міцності (по відношенню до σ_B).

Ясно, що $n_\sigma > 1$; зазвичай $n_\sigma = 2,4 \dots 3,0$ і більше (залежно від відповідальності деталі, тобто від величини збитків у разі руйнування).

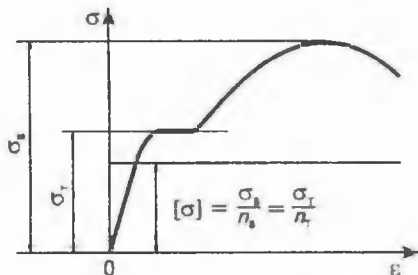


Рис. 1.14
Поняття про допустиме напруження $[\sigma]$

Чим тяжчими можуть бути наслідки, що виникнуть у результаті руйнування деталі, тим більшим має бути призначений (обраний, прийнятий) запас міцності n в рівнянні умови міцності (1.15). Повинен бути також високоміцний матеріал, тобто з високою границею міцності σ_B , а також відповідний вид обробки — термічної, механічної та інших, щоб забезпечити високу границю міцності σ_B .

Для пластичних металів іноді запас міцності n беруть по відношенню до границі текучості σ_T , тобто $[\sigma] = \sigma_T / n_T$.

Значення n_T дещо менше від n_B . Зазвичай $n_T = 1,4 \dots 1,6$ (рис. 1.14).

Крім умови міцності (1.14), має виконуватися також умова жорсткості (щоб уникнути небажано великих деформацій):

$$\epsilon_{\max} \leq [\epsilon], \quad (1.17)$$

тобто

$$\epsilon_{\max} = \sigma_{\max} / E \leq [\epsilon], \quad (1.18)$$

або

$$\Delta l = Fl / ES \leq [\Delta l], \quad (1.18a)$$

де $[\epsilon]$ — допустиме відносне видовження, що дорівнює $\epsilon_{\max} / n$;

$[\Delta l]$ — допустиме абсолютне видовження (дорівнює $\Delta l_{\text{пмах}}/n$).

Умова міцності (1.14), як і умова жорсткості (1.17), дає змогу розв'язувати такі види задач.

1. Якщо деталь уже є і працює, тобто відомі розміри S і l , характеристики матеріалу σ_B, σ_T, E і навантаження F , то, користуючись умовою міцності $\sigma = F/S \leq \sigma_B/n$, можна з'ясувати, який запас міцності n має деталь:

$$n \leq \sigma_B S / F.$$

2. Якщо відоме навантаження F , характеристики матеріалу σ_B, σ_T, E і заданий запас міцності n , то можна визначити потрібні розміри деталі (площу перерізу S), $S \geq F n / \sigma_B$. (При підвищенні σ_B при одному й тому самому запасі міцності n зменшуються розміри деталі S , а відтак її об'єм і вага, тобто зменшуються витрати матеріалу і матеріалоемність конструкції.)
3. Якщо відомі розміри S , характеристики матеріалу σ_B, σ_T, E і задано потрібний запас міцності n , то можна визначити найбільше допустиме навантаження F , $F \leq \sigma_B S / n$. (При підвищенні σ_B можна допустити більше навантаження.)

Таким же чином, користуючись умовою жорсткості (1.18) або (1.18, а) $Fl/ES \leq \epsilon/n$, виконують розрахунки на жорсткість.

Отже, умови міцності та жорсткості (головним чином умова міцності, умова жорсткості — додаткова), характеристики σ_B, σ_T, E , а відтак — діаграма $\sigma - \epsilon$ є основою курсу опору матеріалів, тобто основними в розрахунках на міцність (і жорсткість).

Це ще раз підтверджує, наскільки важливо знати будову (структуру) матеріалу, як із нею пов'язані характеристики матеріалу, якими методами і за яких режимів можна впливати на будову і властивості матеріалів з метою поліпшення їхніх експлуатаційних можливостей (а відтак надійності, довговічності й матеріалоемності конструкцій).

§ 1.6

Втомна міцність

Виконання умови міцності (1.14) забезпечує надійну роботу матеріалу (деталей машин та елементів конструкцій) лише при статичному навантаженні, тобто незмінному в часі або такому, що

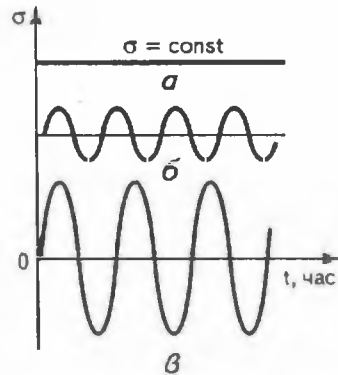


Рис. 1.15

Графіки циклічного навантаження:

a — статичне (постійне) навантаження;
б — асиметричний цикл; *в* — симетричний цикл

змінюється дуже повільно (рис. 1.15, *a*). Якщо ж навантаження циклічне, тобто таке, що періодично повторюється багато разів (рис. 1.15, *б*, *в*), то руйнування може відбутися при напруженнях менших не лише від σ_B , або σ_T , а навіть від σ_{np} (і $[\sigma]$). Руйнування під дією циклічних навантажень називається *втомним*.

Здатність матеріалів чинити опір втомному руйнуванню називається **втомною міцністю**. Її характеризує *границя витривалості* — найбільше напруження, яке може витримати матеріал при безмежному числі циклів навантаження N . Позначається границя витривалості при симетричному циклі навантаження σ_{-1} .

Визначають границю витривалості σ_{-1} експериментально, випробовуючи 8...12 зразків. Першому зразку задають напруження, що приблизно дорівнює $0,8 \sigma_T$. Він зруйнується після N_1 циклів. Другому

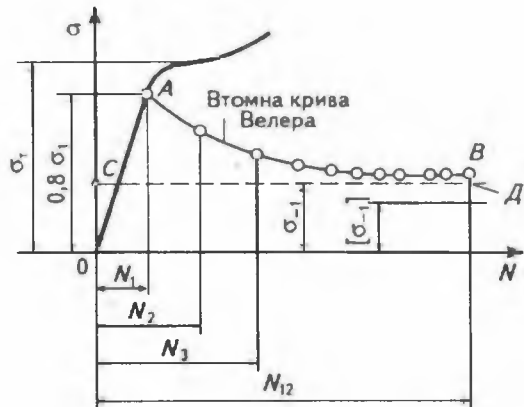


Рис. 1.16

Визначення границі витривалості σ_{-1} (*AB* — втомна крива; $[\sigma_{-1}]$ — допустиме напруження)

зразку задають менше напруження, він витримує більше число циклів (N_2) — і так далі до N_{12} . Одержані дані, тобто точки з координатами $\sigma_i - N_i$, заносять у систему координатних осей $\sigma - N$ (рис. 1.16).

З'єднуючи ці точки, одержують графік — так звану втомну криву AB . При збільшенні числа циклів вона наближається до прямої CD , що є паралельною осі абсцис ON і відстоїть від цієї осі на віддалі, що дорівнює σ_{-1} .

Звичайно ж, і при дії циклічних навантажень розрахунок на міцність робиться за допомогою умови міцності, а саме:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_{-1}],$$

де $[\sigma_{-1}] = \sigma_{-1} / n$, а n — запас міцності.

Для різних матеріалів $\sigma_{-1} = (0,25 \dots 0,55) \sigma_B$; для сталей $\sigma_{-1} = 0,28 \sigma_B$. Отже, підвищення загальної, статичної міцності (σ_B) приводить до збільшення втомної міцності. Технологічні методи підвищення міцності буде розглянуто в розділі про будову матеріалів і методи обробки.

§ 1.7

Дисипація енергії

Для деформування матеріалу в межах пропорційності (на ділянці $0 - I$ діаграми $\sigma - \epsilon$) теж треба виконати роботу A , що дорівнює накопиченій енергії. Саме ця енергія, вивільняючись, створює умови до відновлення форми та розмірів зразка. Теоретично вона дорівнює площі частини діаграми, де виконується закон Гука (площі заштрихованого трикутника, тобто $A = 1/2 F \Delta l$) (рис. 1.17). Насправді, при навантаженні виявляється відхилення від прямої $0 - I$: навантаження відбувається по лінії $0a1$, розвантаження — по лінії $1b0$. Утворюється петля так званого механічного (пружного) гістерезису, площа якої ΔA дорівнює частині енергії, що не вивільнилася при розвантаженні, а залишилась у матеріалі, незворотно розсіявшись у ньому в вигляді тепла за один цикл навантаження—розвантаження.

Здатність матеріалу поглинати при розвантаженні частину енергії, накопиченої в ньому в разі пружного деформування, називається *дисипацією (розсіянням) енергії*.

Характеристикою цієї властивості є логарифмічний декремент δ :

$$\delta = \Delta A / 2A. \quad (1.19)$$

(Не плутати з $\delta = l_1 - l_0 / l_0 \cdot 100 \%$, тобто з характеристикою пластичності (1.9))



Рис. 1.17

Петля механічного гістерезису

Втрата частини енергії (дисипація, розсіяння, поглинання) при пружному деформуванні за кожний цикл навантаження — розвантаження призводить до затухання вільних коливань (рис. 1.18) і зменшення амплітуди вимушених коливань при резонансі (рис. 1.19), тобто зумовлює демпфірування (гасіння) коливань, що надзвичайно важливо в техніці, особливо коли немає можливості встановити спеціальні штучні демпфери. А *відтак дисипація ще називається демпфіруючою здатністю матеріалів* і має чимало характеристик (пов'язаних з логарифмічним декрементом δ), а саме:

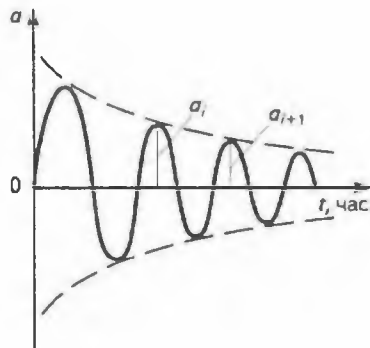


Рис. 1.18

Графік вільних коливань,
що затухають

$$\delta = \Delta A / 2A = \ln a_i / a_{i+1} = \pi Q^{-1} = \pi \gamma = \pi / Q, \quad (1.20)$$

де a_i і a_{i+1} — відповідно амплітуди попереднього і наступного циклів (див. рис. 1.18);

Q^{-1} — “внутрішнє тертя”;

γ — коефіцієнт затухання (гасіння, або демпфірування) коливань;

Q — добротність.

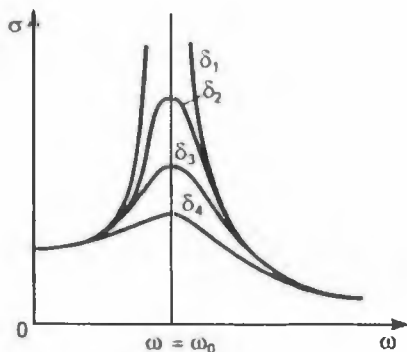


Рис. 1.19

Графіки впливу дисипації енергії (логарифмічного декременту δ) на рівень напружень σ при вимушених резонансних коливаннях:

ω_0 — частота вільних коливань;

ω — частота змушених коливань;

$\omega / \omega_0 = 1$ — стан резонансу

Демпфірувальна здатність чутлива до стану структури матеріалу. Вона низька у сталей, особливо загартованих, досить висока в сірих чавунах, сплавах мідь — марганець і особливо в полімерах. Матеріали з високою демпфірувальною здатністю використовуються як звуко- і вібропоглинаючі.

§ 1.8

Твердість і методи її визначення

Твердість — це властивість матеріалів чинити опір проникненню в них загострених, твердих тіл — інденторів (англ. *indent* — зазубрина, виїм).

Методів визначення твердості чимало: дряпанням, динамічні, статичні. Найбільш поширені статичні — вдавлюванням індентора в поверхневі шари випробовуваного матеріалу. Індентор — кулька, конус або пірамідка — виготовляється з алмазу, загартованої сталі або з твердого сплаву.

Метод Брінелля. Число твердості — HB, індентор — сталева кулька діаметром D , що дорівнює 10; 5 або 2,5 мм, вдавлюється навантаженням F (Н). За допомогою спеціального мікроскопа вимірюється діаметр d відбитка (мм), а відтак визначається число твердості HB (рис. 1.20, а):

$$HB = F/S, \quad (1.21)$$

де S — площа поверхні відбитка (мм^2), тобто сферичного сегмента $S = \pi D/2 \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$.

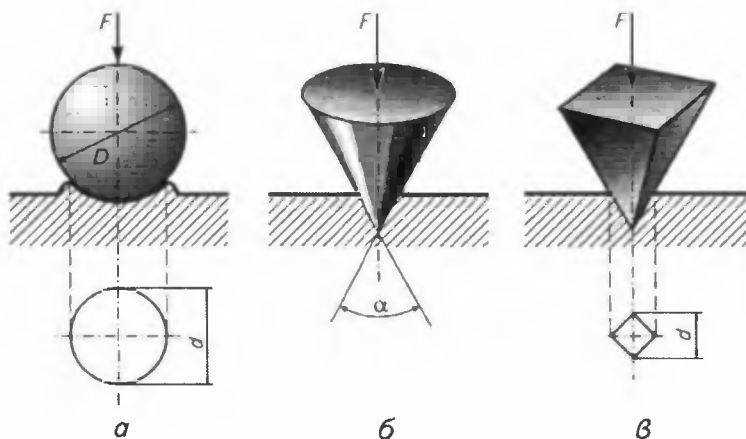


Рис. 1.20

Визначення твердості:

а — за Брінеллем; б — за Роквеллом; в — за Віккерсом

Для того щоб при випробуванні кульками різних діаметрів одержувати однакові числа твердості, діаметр D і навантаження F слід вибирати за табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Матеріал	Твердість HB, МПа	Товщина зразка, мм	Діаметр кульки, мм	Наванта- ження, Н	Тривалість навантаження, с
Чорні метали	1400...4500	> 6	10	3000	10
Те саме	1400...4500	6...3	5	7500	10
"	1400...4500	< 3	2,5	1875	10
"	< 1400	> 6	10	1000	10
"	< 1400	6...3	5	2500	10
"	< 1400	< 3	2,5	625	10

Закінчення табл. 1.4

Матеріал	Твердість НВ, МПа	Товщина зразка, мм	Діаметр кульки, мм	Наванта- ження, Н	Тривалість навантаження, с
Кольорові метали	300...1300	> 6	10	1000	30
Те саме	300...1300	6...3	5	2500	30
Те саме	300...1300	< 3	2,5	625	30
"	80...300	> 6	10	2500	60
"	80...300	6...3	5	625	60
"	80...300	< 3	2,5	156	60

Метод Брінелля дає надійні результати в межах 80...4500 НВ.

Значення НВ для деяких матеріалів

Свинець (Pb)	30...80
Золото (Au)	130...250
Залізо (Fe)	500...800
Сталі	1500...3000
Загартовані сталі	6000...7000

Метод Роквелла. Число твердості — HR, індентор — алмазний конус (рис. 1.20, б) або загартована сталева кулька $D = 1,59$ мм. Навантаження F на індентор складається з двох частин:

$$F = F_0 + F_1,$$

де $F_0 = 0,1$ кН — попереднє навантаження;

$F_1 = 0,5; 0,9$ або $1,4$ кН — основне навантаження.

Отже, сумарне, або загальне, навантаження F може бути: 0,6; 1,0 або 1,5 кН.

Число твердості, за Роквеллом, пов'язане з глибиною проникнення індентора й автоматично визначається твердоміром за допомогою індикатора, що має три "шкали Роквелла" A, B, C , а відтак — три можливі числа твердості HRA, HRB і HRC. Причому шкали A і C — чорного кольору, B — червоного (табл. 1.5).

Таблиця 1.5

Матеріали	Навантаження F , кН	Індикатор	Колір шкали	Число твердості	Твердість
Дуже тверді	6	Конус	Чорна	HRA	70

Закінчення табл. 1.5

Матеріали	Навантаження F , кН	Індикатор	Колір шкали	Число твердості	Твердість
М'які та середні	10	Кулька	Червона	HRB	До 100
Середні та тверді	15	Конус	Чорна	HRC	20...70

HR не має розмірності, вимірюється в межах твердості 20...100 HR, наприклад для загартованих сталей 60...70 HR.

Метод Віккерса. Число твердості — HV, індентор — алмазна чотиригранна піраміда (рис. 1.20, в). Величина навантаження дорівнює 10; 30; 50; 100; 200; 300; 500; 1000 та 1200 Н (частіше 100 Н). Тривалість навантаження для чорних металів становить 10...15 с, для кольорових — 30 с. При відомому навантаженні F вимірюється (за допомогою вмонтованого у прес мікроскопа) діагональ відбитка d (рис. 1.20, в) і визначається число твердості HV (S — площа поверхні відбитка):

$$HV = F/S = 18,54 F/d^2.$$

Методом Віккерса можна визначити твердість будь-яких матеріалів — від найм'якших і до алмаза (практично до 9 000 МПа).

Між значеннями твердості, виміряними різними методами, існує відповідна кореляція, яку подають у вигляді таблиць, номограм тощо.

Числа твердості за Брінеллем і Віккерсом практично співпадають до 4000 МПа, тобто $HV = HB$.

При визначенні твердості дуже тонких стрічок, фольг, дроту малих діаметрів, тонких деформованих шарів, гальванічного покриття, напilenня, твердості окремих структурних складових сплавів тощо, тобто при визначенні мікротвердості, теж застосовується вдавлювання алмазної пірамідки з кутом при вершині $\alpha = 136^\circ$ при навантаженні, що може становити 0,05...50 Н. Випробування проводять на приладі ПМТ-3.

Метод Мооса — десятибальна шкала для визначення твердості мінералів. Визначається твердість дряпанням (алмазним або твердо-сплавним наконечником) і характеризується кількістю балів НМ (від 1 до 10):

Тальк — 1;	Ортоклаз — 6;
Гіпс — 2;	Кварц — 7;
Кальцит — 3;	Топаз — 8;
Флюорит — 4;	Корунд, сапфір — 9;
Апатит — 5;	Алмаз — 10.

Між твердістю та міцністю (границею міцності σ_B) є досить стійка кореляція (співвідношення або взаємний зв'язок), а саме: $\sigma_B = k \text{ НВ}$.

Для широкого класу матеріалів (при руйнуванні яких утворюється шийка) $k = 0,025...0,55$, тобто

$$\sigma_B = 0,25...0,55 \text{ НВ.} \quad (1.22)$$

Конкретно для сталей можна вважати

$$\sigma_B = 0,36 \text{ НВ.} \quad (1.23)$$

Твердість значною мірою зумовлює іншу властивість матеріалів — *зносоустійкість*, тобто здатність матеріалів чинити опір зношуванню. Зношування (спрацювання) — це процес зміни розмірів, форми, маси або стану поверхневих шарів матеріалу під впливом тертя та зовнішнього середовища. Зношування (спрацювання) буває: абразивне, корозійно-механічне, ерозійне тощо. У випадку абразивного зношування (від лат. *abraso* — шкребти), коли тверді частинки абразиву (наприклад, піску) виривають дрібні частки матеріалу, зносоустійкість зростає з підвищенням твердості зношуваних матеріалів. Отже, всі технологічні методи (гартування, наклеп, термохімічна обробка тощо), що збільшують твердість (а відтак і міцність), водночас підвищують також і зносоустійкість.

§ 1.9

Напружений стан та види руйнування

З курсу фізики відомі графіки залежності та зміни сил пружної взаємодії між атомами (рис. 1.21). Нехай атоми N_1 і N_2 знаходяться на відстані r . Зміна відстані r між атомами тіла (матеріалу) при його навантаженні зовнішніми силами, а відтак при деформуванні тіла в цілому, зумовлює зміну сил пружної взаємодії атомів — сил пружності. Саме сили пружності, додаткові до тих, що мають місце в ненавантаженому тілі, і створюють (зумовлюють) напруження.

Тим, що напруження визначаються в точці твердого тіла, вони схожі з тиском P всередині рідини або газу. Але якщо тиск P , за законом Паскаля, в кожній точці і в будь-якому напрямку однаковий, то напруження в твердому тілі, залежно від характеру

зовнішніх сил, може не лише змінюватися від однієї точки тіла до іншої (неоднорідний напружений стан), а й мати різний знак: додатний (при розтягуванні) або від'ємний (при стисканні). Отже, напруження являє собою вектор (з величиною і напрямком). Якщо напруження діє лише в одному напрямку — це лінійний напружений стан (див. рис. 1.4), якщо в двох — плоский, в трьох напрямках — об'ємний.

Таким чином, *напружений стан* — це сукупність напружень, що діють у будь-якій (певній) точці тіла. Отже, розрізняють три види напруженого стану: лінійний, плоский та об'ємний.

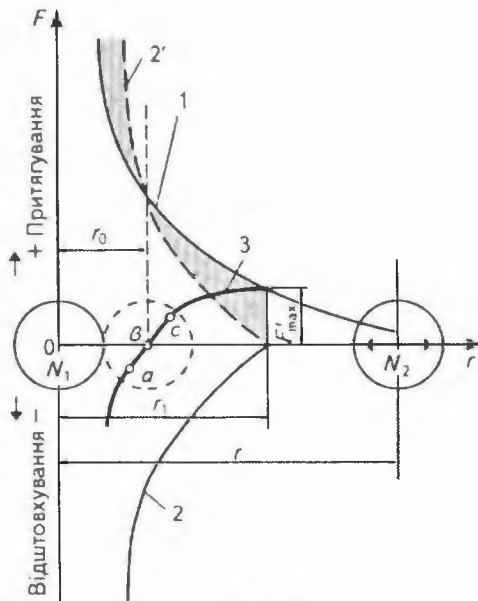


Рис. 1.21

Сили взаємодії між двома атомами N_1 і N_2

Зміна форми та розмірів тіла (тобто його деформація) під дією зовнішніх навантажень та виникнення напруженого стану є результатом зміни відстані між атомами. На рис. 1.21 крива 1 характеризує сили притягання (додатні); крива 2 — сили відштовхування (від'ємні); крива 3 — їхня рівнодійна. Допоміжна крива 2' відповідає абсолютній величині сил відштовхування, тобто різниці ординат ліній 1 і 2' відповідає ординатам рівнодійної 3. Отже:

- а) при $r = r_0$ (тобто при відсутності зовнішніх навантажень) орбіти атомів дотикаються, при цьому сили притягання і відштовхування врівноважуються, напруження не виникають;
- б) при $r < r_0$ (тобто за дії зовнішніх стискних навантажень) переважають сили відштовхування, а відтак виникають від'ємні (стискні) напруження;
- в) при $r > r_0$ (тобто за дії зовнішніх розтяжних навантажень) переважають додатні сили — сили притягання, а відтак виникають додатні (розтяжні) напруження.

Крива 3 — рівнодійна. Саме вона відображає закон опору матеріалу пружному деформуванню і називається силою пружності.

Ділянка ac (див. рис. 1.21) прямолінійна і відповідає законові Гука: від'ємна частина ac — при стисканні, додатня ca — при розтягуванні. Нижче точки a й вище за точку c залежність $F - r$ нелінійна (це є відхиленням від закону Гука).

Найбільша сила притягання $F_{\max}$ виникає при $r = r_1$. Вона називається *когезивною силою*, тобто силою зчіплення між атомами одного і того самого матеріалу (на відміну від адгезивних сил, тобто сил зчіплення між різнорідними атомами — атомами різних матеріалів).

Когезивна сила $F'_{\max}$ зумовлює величину найбільшого напруження, що може виникнути в матеріалі, тобто відповідає теоретичній границі міцності $\sigma_{в.т.}$. Теоретичною вона називається тому, що визначається теоретично — методом розрахунку, виходячи з величини когезивної сили $F'_{\max}$; $\sigma_{в.т.} = 0,1 E$ (E — модуль Юнга).

На відміну від теоретичної, реальна границя міцності $\sigma_{в.}$ визначається експериментально при розтягуванні так званих зразків (див. рис. 1.7) і обчислюється за формулою $\sigma_{в.} = F/S$.

Реальна границя міцності $\sigma_{в.}$ в сотні разів менша за $\sigma_{в.т.}$. Вирішальними чинниками у цьому зниженні є неоднорідність і дефекти мікро- та макробудови реальних технічних матеріалів.

У найпростішому випадку навантаження, тобто при розтягуванні вздовж осі, в поперечному перерізі діють лише нормальні напруження σ . Позначимо їх σ_0 . У будь-якому іншому перерізі, нахиленому до поперечного під довільним кутом α , крім нормальних, виникають також напруження, що діють в самій площині цього перерізу. Вони називаються дотичними, позначаються літерою τ . При цьому

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_0}{2} \sin 2\alpha. \quad (1.24)$$

Найбільшого значення τ набувають при $\alpha = 45^\circ$, тобто $\tau_{\max} = \tau_{\alpha=45} = \frac{\sigma_0}{2}$ (σ_0 визначається за формулою (1.1)).

У загальному випадку, тобто при більш складних навантаженнях, τ діють у будь-якій точці площини будь-якого перерізу, окрім трьох взаємно перпендикулярних, так званих головних, площинок, на яких $\tau = 0$. Нормальні напруження σ на цих площинках називаються головними і позначаються $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

На відміну від нормальних напружень σ , які спричиняють лінійну деформацію видовження або вкорочення Δl (див. рис. 1.2, а), дотичні напруження τ діють у площині перерізу (рис. 1.22, б, в). Вони пов'язані з деформацією зсуву γ , а тому називаються ще *напруженнями зсуву*.

Звичайно ж напруження τ вимірюється в тих самих одиницях, що і σ , тобто $\tau = F/S$, де F — зсувна сила, S — площа зсуву.

Закон Гука в разі дії дотичних (зсувних) напружень τ , а отже — деформації зсуву в пружній області навантаження (див. графік на рис. 1.6, в), записується аналогічно формулі (1.3), тобто

$$\tau = G\gamma,$$

де γ — кутова деформація;

G — модуль пружності (зсуву), пов'язаний з модулем Юнга E залежністю $G = kE$ (k для різних матеріалів знаходиться в межах 0,33...0,5), тобто

$$G = (0,33...0,5)E.$$

За значних навантажень, коли напруження досягають границі міцності σ_B при розтягуванні (стисканні) і τ_B при зсуві, відбувається руйнування.

Руйнування, що відбувається під дією нормальних напружень шляхом відриву, називається *крихким*. Так руйнуються загартовані сталі, сірі чавуни, алмаз, кремній тощо.

Руйнування, що відбувається під дією дотичних напружень (зсуву) τ в результаті розвитку пластичних деформацій, називається *в'язким*. Такому руйнуванню піддається більшість пластичних матеріалів (а це супроводжується утворенням шийки).

Отже, два види напружень — σ і τ — зумовлюють два види руйнування: крихке і в'язке. Під сукупною дією σ і τ частіше відбувається змішане руйнування.

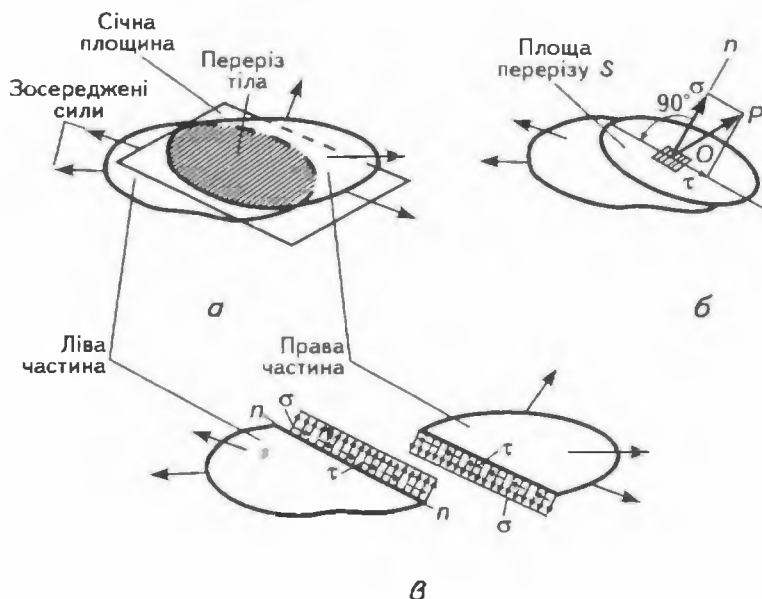


Рис. 1.22

Метод перерізів і визначення напруження σ і τ :

a — січна площина; $б$ — залишена ліва частина тіла з векторами напружень у точці O ;
 $в$ — вигляд місця перерізу збоку, n — n — слід січної площини.

Зміна відстані між атомами, а відтак виникнення сил пружності й відповідно — напружень, може спричинятися не лише дією зовнішніх навантажень, які вони врівноважують, а також зміною температури та іншими причинами (про них ітиметься в розділі 2). Напруження, що виникають за відсутності зовнішніх навантажень, називають самоврівноваженими, внутрішньоврівноваженими (або залишковими). Часто їх іще називають “внутрішніми”, що неточно, бо *всі напруження — внутрішні, зовнішніх напружень не буває!*

 Контрольні запитання

1. Що вивчають у курсі матеріалознавства?
2. Що таке технологія?
3. Яка різниця між технологією і технікою?
4. Які матеріали називаються конструкційними?
5. На які види поділяються метали? Які метали називаються чорними?
6. Назвіть основні види неметалевих матеріалів.
7. На які види поділяються властивості матеріалів?
8. Перелічіть основні механічні властивості конструкційних матеріалів.
9. Що таке напруження; в яких одиницях воно вимірюється? Назвіть два види напружень, як вони позначаються, з якими видами деформацій пов'язані?
10. Яка різниця між напруженням, тиском та силою? В яких одиницях вони вимірюються?
11. Яка різниця між деформуванням і деформацією? Назвіть основні види деформування і деформацій.
12. Як називаються деформації при простому розтягуванні (стисканні) стержня; як позначаються абсолютні й відносні деформації та в яких одиницях вимірюються? Яка різниця між Δl та ϵ ?
13. Запишіть формулу закону Гука (два вирази). Яку властивість матеріалу цей закон відображує?
14. Що таке жорсткість матеріалу, якою характеристикою вона характеризується, в яких одиницях вимірюється?
15. Назвіть числове значення модуля жорсткості E для сталей.
16. Що таке міцність, як називається та позначається її характеристика, як вона визначається?
17. Зобразіть графічно діаграму $\sigma - \epsilon$ для маловуглецевих сталей. Що позначено літерами σ та ϵ ? Як ці літери називаються?
18. Що таке пружність? Яка її характеристика? Укажіть її на діаграмі $\sigma - \epsilon$.
19. Що таке границя пропорційності? Як вона позначається?
20. Що таке "текучість" матеріалу? Як вона зображується на діаграмі $\sigma - \epsilon$? Як називається і позначається її характеристика?
21. Що таке пластичність матеріалу? Скільки величин та які її характеризують? Як вони називаються та позначаються? В яких одиницях вимірюються?
22. Яка різниця між σ та δ ?

23. Яка різниця між δ та ϵ ?
24. Що таке в'язкість матеріалу? Чим вона характеризується? Покажіть цю характеристику на діаграмі $\sigma - \epsilon$. В яких одиницях вимірюється? Запишіть формулу для визначення в'язкості.
25. Дайте визначення твердості.
26. Назвіть основні відмінності між пластичними та крихкими матеріалами.
27. Назвіть основні методи визначення твердості. Як позначається і в яких одиницях вимірюється твердість за різними методами?
28. У чому різниця між HRA, HRB та HRC?
29. Яка залежність між твердістю та міцністю (границею міцності) металів?
30. Яка залежність між числами твердості, визначеними різними методами?
31. Що таке ударна в'язкість? Як вона визначається, в яких одиницях вимірюється?
32. Що таке концентрація напруження? Яка величина характеризує ступінь концентрації напруження? Наведіть приклади концентраторів напруження.
33. Що таке умова міцності? Що таке допустиме напруження? Що таке запас міцності? Які задачі можна вирішувати за допомогою умови міцності?
34. Що таке втомна міцність? Як називається та позначається її характеристика?
35. Що таке дисипація енергії?
36. Яка різниця між нормальними σ і дотичними (зсувними) напруженнями τ ?

Глава 2

Вплив різних факторів на механічні властивості матеріалів

Наведені раніше значення механічних характеристик одержані випробуванням зразків при так званих нормальних умовах (кімнатна температура, статичне навантаження, зовнішнє середовище тощо). Однак один і той самий матеріал залежно від умов експлуатації (випробування) може знаходитись в пластичному або крихкому стані. Іншими словами, механічні характеристики міцності та пластичності суттєво залежать від низки чинників (факторів). Основні з них: висока або низька температура, пластичне деформування, швидкість навантаження, вид напруженого стану, радіоактивне опромінення, так званий масштабний фактор, вплив зовнішнього середовища та деякі інші.

§ 2.1

Вплив температури

Модуль E (і G), що характеризує жорсткість матеріалу, знижується при нагріванні в середньому на 2...4 % на кожні 100 °С. Так, в сталях при 600 °С модуль E знижується на 25...30 %; при 800 °С — до 50 % (у кольорових металів — більш суттєво). Міцність (σ_B) і твердість (НВ) знижуються, пластичність (δ , ψ) і в'язкість (a) — підвищуються. Це основна тенденція, але можуть бути й аномалії, як показано на рис. 2.1 для маловуглецевої сталі (0,15 % С): σ_B і σ_T спочатку дещо зростають; δ , ψ і a_n знижуються — це так зване явище *синьоламкості* (за температури близько 300 °С колір відполірованої поверхні —

колір мінливості — яскраво синій). Зниження в'язкості можливе у деяких сталей також за температури 900...1000 °С — це *червоноламкість* (при цих температурах сталь має яскраво червоний колір).

У деяких кольорових металів (наприклад, Al, Mg) підвищення температури спричиняє зростання пластичності, а в інших (Cu, Ni, латунь) — зменшення. Причому σ_B знижується безперервно і більш інтенсивно.

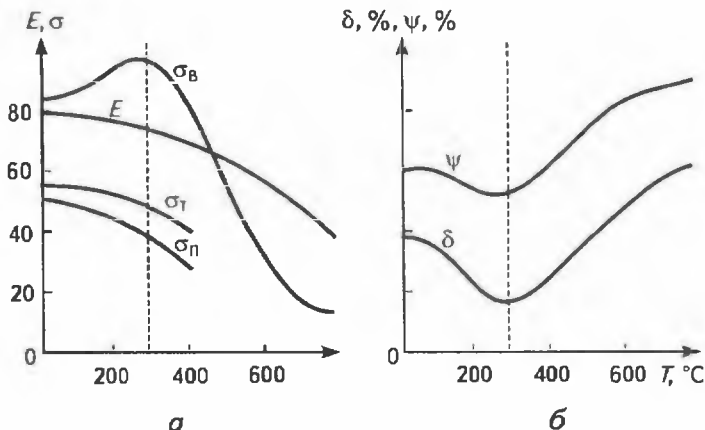


Рис. 2.1

Залежність характеристик міцності (а) та пластичності (б) від температури для маловуглецевої сталі

Границя витривалості σ_{-1} в межах від -40 до 300 °С змінюється несуттєво; при подальшому підвищенні температури σ_{-1} знижується на 15...20 % на кожні 100 °С, а при мінусових температурах — підвищується. Також підвищується σ_B і σ_T . Пластичність і в'язкість (δ , ψ , a) при мінусових температурах спадають.

Ударна в'язкість (a_H) при зниженні температури безперервно зменшується; у деяких матеріалів за певної температури спостерігається різке падіння a_H . Це явище — дуже небажане — називається *холодноламкістю*. Температура, за якої це відбувається, називається *порогом холодноламкості* (рис. 2.2).

На поведінку матеріалів при нагріванні впливає не лише рівень температури, але і тривалість її дії. При тривалому знаходженні матеріалу в нагрітому стані спостерігаються (мають місце) явища повзучості і релаксації напружень.

Повзучість — це повільне, але безперервне наростання пластичної деформації за високої температури при навантаженні, що не змінюється (а відтак, при постійному напруженні $\sigma = \text{const}$).

! У в а г а. Не плутати повзучість з текучістю.

Рис. 2.2

Графік залежності ударної в'язкості a_n від температури:

1 — за відсутності холодноламкості;
2 — за наявності холодноламкості



Так звана “крива повзучості” (в координатах $\epsilon - t$, де t — час) показана на рис. 2.3, де $0a$ — початкова (пружна) деформація. Далі чітко спостерігаються три ділянки:

ab — деформація, що не встановилась, швидкість наростання $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = \dot{\epsilon}$ сповільнюється (ділянка $a'b'$);

bc — ділянка, де швидкість повзучості постійна, тобто $\dot{\epsilon} = V = d\epsilon/dt = \text{const}$ (ділянка $b'c'$);

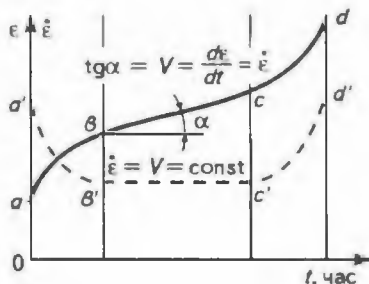
cd — ділянка, де швидкість повзучості збільшується, закінчується в точці d зруйнуванням.

Чим більше напруження σ ($\sigma = \text{const}$!), тим інтенсивніша повзучість: ділянка bc скорочується і може бути відсутня зовсім (як при напруженні σ_4 на рис. 2.4, а). При малих напруженнях σ (і незначних температурах) ділянки cd може і не бути.

Природно, що в разі збільшення температури (при $\sigma = \text{const}$) швидкість повзучості також збільшується (рис. 2.4, б).

Рис. 2.3

Крива повзучості $\epsilon - t$
($abcd$ — крива повзучості)
та графік зміни швидкості повзучості
($a'b'c'd'$)



У деяких матеріалів (свинець, латунь, бронза, пластмаси) повзучість відбувається вже за кімнатної температури.

Здатність матеріалів чинити опір повзучості характеризується умовною *границею повзучості*, тобто напруженням, за якого при заданій температурі через заданий проміжок часу деформація досягає заданої величини.

Позначається умовна границя повзучості σ_{ϵ}^T % - t , час, або σ_{ϵ}^T /год.

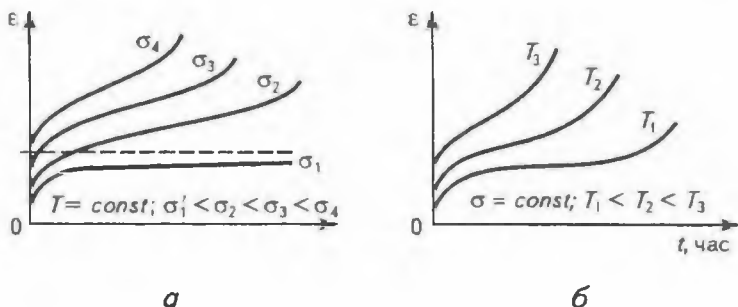


Рис. 2.4

Графіки залежності швидкості повзучості від напруження та температури:

- а — при різних значеннях напруження σ і постійній температурі;
б — при різних значеннях температури і незмінному напруженні

Наприклад, $\sigma_{1\% - 10\,000}^{500^\circ} = 150$ МПа, або $\sigma_{10^{-4}}^{500^\circ}$ /год, де 150 МПа — це напруження, за якого через 10 000 год при $T = 500^\circ\text{C}$ деформація є дорівнюватиме 1 %. Отже, саме ці три чинники — T , ϵ та t — обумовлюють вимоги до вибору матеріалу, що забезпечать надійність роботи деталі, тобто потрібну умовну границю повзучості. Так:

- у лопаток парових турбін 1 % відносної деформації має бути досягнутий за 10 років;
- у лопаток газових турбін — 1...2 % за 100...500 годин;
- у трубах парових котлів — 1 % за 100 000 годин.

У результаті поступового наростання деформації при високих температурах протягом значного часу, тобто в результаті повзучості, крихке руйнування може відбутися при напруженнях, менших не лише границі міцності σ_B , а навіть менших границі пропорційності $\sigma_{пл}$.

Здатність матеріалів працювати, тобто чинити опір навантаженню тривалий час при високих температурах, не руйнуючись, характеризує умовна границя довготривалої міцності σ_t^T — це напруження (при даній постійній температурі), за якого руйнування відбудеться в кінці заданого проміжку часу. Наприклад,

$$\sigma_{450}^{700} = 800 \text{ МПа},$$

тобто при $\sigma = 800$ МПа руйнування при 700°C відбудеться після 450 год роботи.

Більшість сплавів в авіації випробовують протягом 100...500 год, для стаціонарних газових турбін — протягом 1000...3000 год.

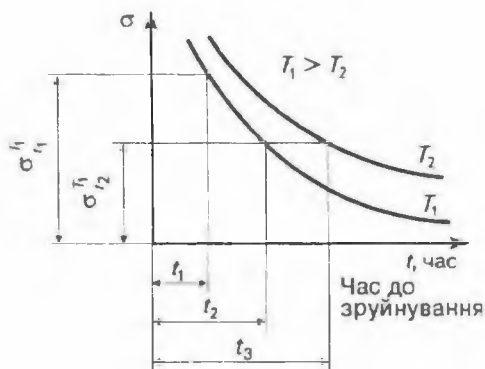


Рис. 2.5

Залежність між напруженням σ і тривалістю роботи до зруйнування (при постійній температурі)

Результати випробування представляють у вигляді залежності $\sigma - t$ при заданій температурі (рис. 2.5). Як видно, чим триваліший час при тій самій температурі має працювати деталь, тим менше напруження можна їй задати. При нижчій температурі при тому самому напруженні час до зруйнування збільшується.

Ці дві величини — $\sigma_{\varepsilon, \% - t}^T$ і σ_t^T — характеризують жароміцність матеріалів.

Жароміцність — це здатність матеріалу чинити опір повзучості і руйнуванню за тривалої дії навантаження при високих температурах.

Жаростійкість — це здатність матеріалів при високих температурах чинити опір хімічному впливу агресивних середовищ, що

спричиняють корозію, а відтак — призводять до зниження міцності і окрихчення (особливо ψ).

Релаксація напружень — це поступове зменшення напруження при заданій постійній деформації ($\epsilon = \text{const}$) і незмінній високій температурі ($T = \text{const}$).

Релаксація (розсмоктування) відбувається в результаті наростання пластичної деформації $\epsilon_{\text{пл}}$ за рахунок пружної $\epsilon_{\text{пр}}$ при постійній загальній деформації ϵ , тобто при $\epsilon = \epsilon_{\text{пр}} + \epsilon_{\text{пл}} = \text{const}$ (рис. 2.6, а).

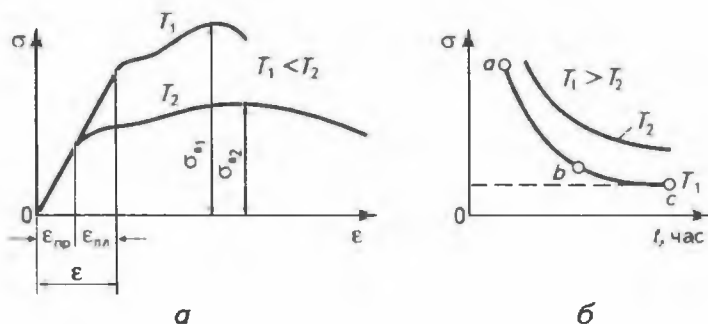


Рис. 2.6

Діаграми $\sigma - \epsilon$ одного й того самого матеріалу при різних температурах: перехід пружної деформації $\epsilon_{\text{пр}}$ в пластичну $\epsilon_{\text{пл}}$ при релаксації (а) та залежність напруження від тривалості t перебування при різних температурах (б)

Зменшення пружної деформації $\epsilon_{\text{пр}}$ супроводжується зниженням напруження σ ($\sigma = E\epsilon$).

Так само як і повзучість, релаксація напруження інтенсивніше відбувається при більш високих температурах ($T_1 > T_2$ — рис. 2.6, б) і більш високих напруженнях (ділянка ab на кривій релаксації ac). У свинцю та полімерів релаксація виражена вже при кімнатній температурі.

Наявність релаксації змушує, наприклад, періодично ретельно контролювати затяжку болтів у фланцевих та інших з'єднаннях парово-або газопроводів, де при незмінній деформації болтів в результаті релаксації напружень може суттєво порушуватись ущільнення, спричиняючи витікання газів чи рідини.

§ 2.2

Вплив пластичного деформування. Наклеп

Пластичне деформування (наклепування або нагартування) призводить до підвищення міцності (σ_B), твердості (НВ), границі текучості (σ_T). Водночас знижується пластичність (δ , ψ) та в'язкості (a , a_H). Це явище одержало назву **наклеп** (нагартровка, механічне або деформаційне зміцнення).

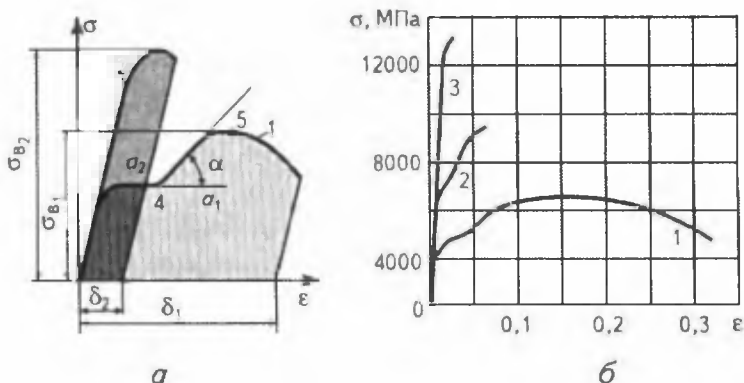


Рис. 2.7

Зміна вигляду діаграми після пластичного деформування:

- σ — (схематично): 1 — до наклепу; 2 — після наклепу;
 δ — (середньовуглецева сталь): 1 — до наклепу (після відпалення);
 2 — після холодної прокатки; 3 — після холодної витяжки (штамповки)

За значного ступеня деформування твердість (НВ) і міцність (σ_B) можуть бути підвищені в 1,5...3 рази, σ_T — у 3...5 разів (рис. 2.7).

Пластичність (δ , ψ) і в'язкість (a) можуть зменшуватися до 10 разів. Наприклад, у міді δ з 50 % зменшується до 5 %, суттєво зменшується також ударна в'язкість a_H .

Схильність матеріалу до наклепу характеризується наявністю на діаграмі $\sigma - \epsilon$ ділянки зміцнення 4—5 (див. рис. 1.8, б, в), а конкретно — інтенсивність наклепу характеризує модуль зміцнення $E' = \tan \alpha$ (рис. 2.7, а). Матеріали, що не мають ділянки зміцнення на діаграмі $\sigma - \epsilon$, не наклепуються, наприклад титан і його сплави (див.

діаграму $\sigma - \epsilon$ на рис. 1.9, б). У наклепаних матеріалах σ_T наближається до σ_B , площадка текучості може зникати (рис. 2.7, а, крива 2).

Отже, феноменологічно (тобто як зовнішній очевидний вияв якихось змін, властивостей або залежностей) наклеп проявляється в суттєвій зміні вигляду діаграм $\sigma - \epsilon$, як це показано на рис. 2.7, а (схематично), та на рис. 2.7, б — для середньовуглецевої сталі і конкретних видів пластичного деформування. Отже, $\sigma_{B_2} > \sigma_{B_1}$; $\delta_2 < \delta_1$; $a_2 < a_1$ (див. також рис. 2.8).

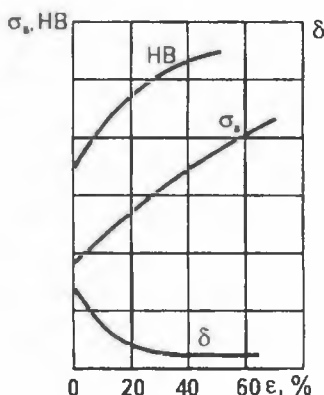


Рис. 2.8
Графіки залежності твердості НВ,
міцності σ_B та пластичності δ
від ступеня пластичного деформування ϵ
для низьковуглецевої сталі

На властивості матеріалів впливає також *опромінення частинками високої енергії*. Цей вплив залежить від спектра частинок і від дози (щільності) опромінення — числа частинок, що пройшли через 1 см^2 поверхні за час опромінення. Суттєві зміни властивостей (і їхніх характеристик) обумовлюються виникненням значної кількості дефектів структури на зразок того, що відбувається в результаті механічного зміцнення (наклепування), а тому зміни характеристик відбуваються в тому ж самому напрямі, що й при наклепуванні. А саме, в результаті бомбардування частинками високої енергії модуль E дещо підвищується (наприклад, при дозі в $4 \cdot 10^{12}$ нейтрон/см² модуль E міді підвищується на 15...20 %, при дозі в 10^{20} нейтрон/см² в реакторі модуль E графіту підвищується втричі).

Підвищується міцність і твердість, пластичність та в'язкість зменшуються (рис. 2.9, а), відбувається окрихчення, поріг холодноламності зміщується вправо (рис. 2.9, в).

Суттєво (на порядок) зменшується дисипація енергії — демпфіруюча здатність (логарифмічний декремент або, так звана циклічна в'язкість). Збільшується швидкість повзучості, знижується опір корозії.

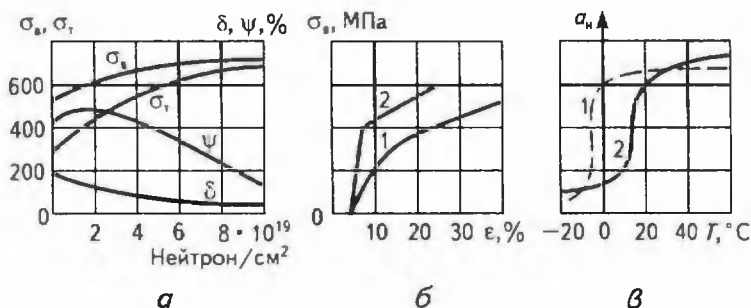


Рис. 2.9

Вплив ступеня опромінення на характеристики міцності σ_v, σ_t і пластичності δ, ψ для сталі (а); діаграми $\sigma - \epsilon$ (для нікеля): 1 — до опромінення; 2 — після опромінення в реакторі (б); залежність ударної в'язкості α_n від температури (для сталі): 1 — до опромінення; 2 — після опромінення (в)

Отже, як і при наклепуванні, суттєво змінюється вигляд діаграми $\sigma - \epsilon$ (рис. 2.9, б). Зміни механічних властивостей після бомбардування частинками високої енергії в більшості випадків є стійкими. Побути цих радіаційних ефектів можна відпаленням (релаксаційним).

Полімерні матеріали (пластмаси) більш чутливі до опромінення, ніж метали. В деяких з них може змінюватися структура (вони стають сітчастими, тобто реактопласти переходять у термопласти), а відтак підвищується твердість, теплостійкість, фторопласт, наприклад, стає крихким.

На властивості матеріалів впливає також швидкість навантаження.

Опір пружному деформуванню (тобто модулі E і G) практично не залежить від швидкості деформування $V = d\sigma/dt$ (оскільки пружна деформація поширюється в матеріалі зі швидкістю звука, що значно перевищує швидкість навантажування).

Границя міцності σ_v підвищується, границя текучості σ_t також збільшується, наближаючись до границі міцності σ_v . Опір пластич-

ному деформуванню зростає, тобто характеристики пластичності (δ і ψ) та в'язкості (a і a_H) зменшуються. Отже, збільшення швидкості деформування сприяє окрихчуванню матеріалу (рис. 2.10): $\sigma_{B_1} < \sigma_{B_2} < \sigma_{B_3}$; $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$; $a_1 > a_2 > a_3$.

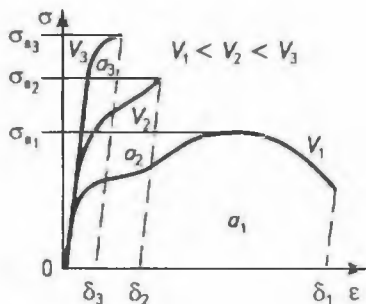


Рис. 2.10
Діаграми $\sigma - \epsilon$ при різних швидкості навантаження

При суттєвому підвищенні частоти циклічного навантаження границя витривалості σ_{-1} у металів дещо зростає, а при наявності концентрації напружень та роботі в корозійному середовищі — знижується.

Найбільше швидкість навантаження впливає на механічні властивості полімерних матеріалів (в тому числі на модуль E , який дещо зростає).

На характеристики матеріалів при циклічному навантаженні (втомна міцність) суттєво впливає частота зміни циклів. У металів границя витривалості σ_{-1} при зниженні частоти навантаження зменшується (значною мірою за наявності концентраторів і в корозійному середовищі).

До суттєвого зменшення σ_{-1} призводить збільшення частоти навантаження у пластмас. Відбувається це внаслідок інтенсивного розігрівання. Якщо ж його усунути, то зниження σ_{-1} не спостерігається.

§ 2.3

Вплив напруженого стану та масштабного фактора

Напружений стан — це сукупність напружень в будь-якій точці навантаженого тіла. Розрізняють три види напруженого стану (рис. 2.11). Цей стан залежить від характеру діючих сил, виду дефор-

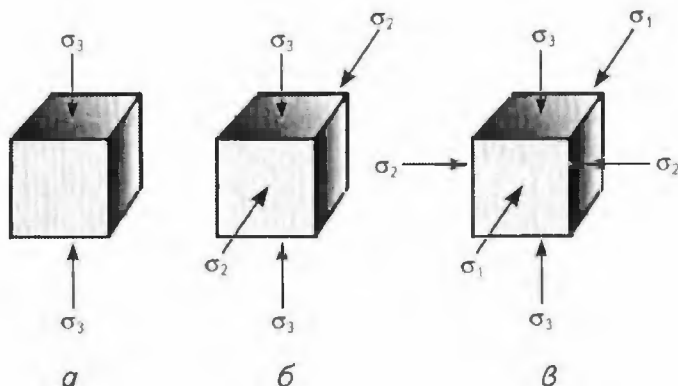


Рис. 2.11

Види напруженого стану:

а — лінійний (одновісний); б — плоский (двовісний); в — об'ємний (тривісний)

мції (розтягування або стискання, зсуву, згину, скручування та їхніх комбінацій).

Всебічне рівномірне навантаження — об'ємний тривісний напружений стан (рис. 2.11, в) — може суттєво підвищувати пластичність. Як приклад, завжди наводять перехід мармуру в пластичний стан в разі гідростатичного стискання, тобто тривісного напруженого стану, коли $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

Нерівномірність розподілення напружень, навпаки, тягне за собою перехід матеріалу від пластичного стану до крихкого. Так, при наявності концентрації напружень матеріал схильний перебувати у крихкому стані як при статичному (коли підвищується σ_b і більш рідко зменшується δ), так і, особливо, при динамічному (циклічному, ударному) навантаженнях. Наприклад, при ударній пробі навмисне

роблять надріз (див. рис. 1.13) з метою зниження пластичності, а отже, для гарантованого зруйнування зразка.

У ряді випадків механічні характеристики залежать від розмірів випробуваних зразків (а відтак від розмірів деталі). Ця залежність, тобто вплив розмірів, називається *масштабним фактором*. Так, опір відриву (σ_b) при збільшенні розмірів поперечного перерізу стержня S дещо зменшується. Міцність тонких ниток з того ж самого матеріалу, навпаки, дещо вища. При збільшенні довжини зразка σ_b і δ також зменшуються. Границя витривалості σ_{-1} при збільшенні розмірів деталі також зменшується (особливо у пластмас).

Вплив масштабного фактора спонукає до стандартизації методів і режимів випробування, а також розмірів зразків при визначенні механічних характеристик.

§ 2.4

Вплив зовнішнього середовища та хімічного складу

Вплив рідинного або газового середовища обумовлюється зниженням поверхневої енергії матеріалів, проникненням рідини в мікропорожнини (так звану розпірну дію), а в полімерів — також і набуханням (особливо значним у поліетилені, капроні). Це спричиняє корозію, зниження границі міцності (σ_b), призводить до окрихчення (особливо знижується ψ), знижується втомна міцність (σ_{-1}), жаростійкість та зносостійкість. Підвищується швидкість і ступінь релаксації напружень, особливо в полімерах (у 5...6 разів у середовищах-розчинниках — ацетон, бензол тощо).

Одна з основних особливостей полімерних матеріалів (пластмас) — це здатність опиратися дії агресивних середовищ (поліетилен, вініпласт, фторопласт тощо). Тому саме з них виготовляють місткості та трубопроводи для транспортування лугів, кислот та інших хімічно активних середовищ.

На механічні характеристики матеріалів суттєво впливає їхній хімічний склад. У матеріалів ускладнення хімічного складу (легуння, модифікування, армування тощо) призводить, як правило, до підвищення міцності, зниження пластичності та в'язкості.

Як приклад, на рис. 2.12 наведено графіки, що відображають вплив вмісту вуглецю у сталях на вигляд діаграми $\sigma - \epsilon$, на характеристики міцності, пластичності та вплив легуючих елементів на ударну в'язкість a_H .

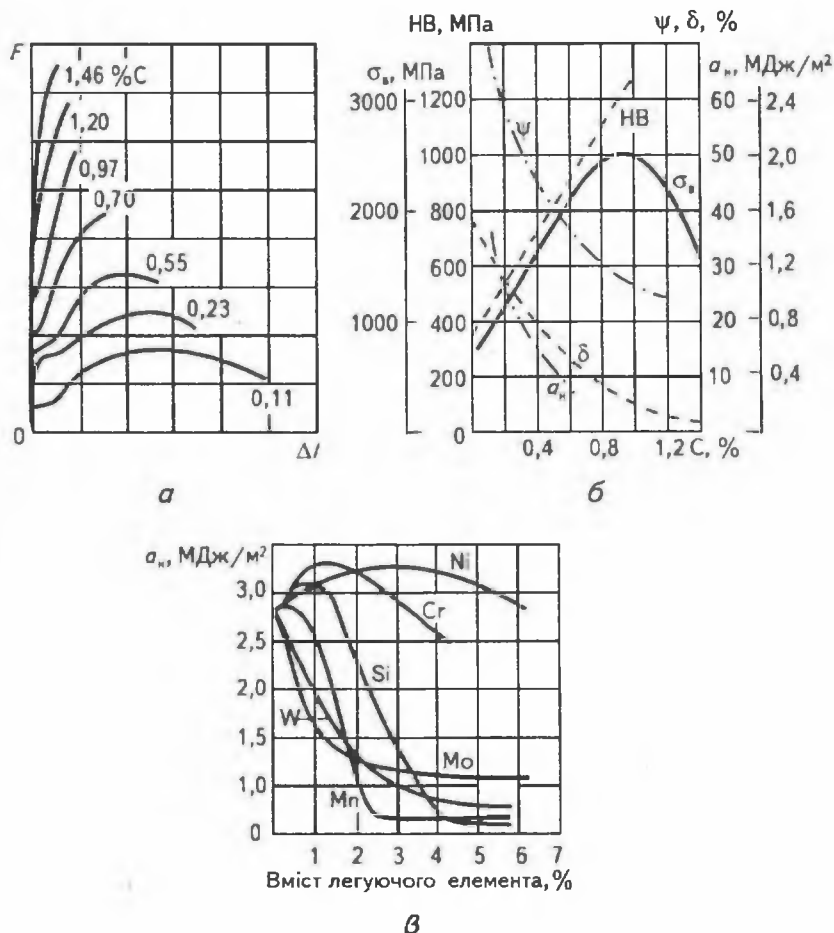


Рис. 2.12

Графіки зміни вигляду діаграми $\sigma - \epsilon$ при зміні вмісту вуглецю (а); залежність властивостей вуглецевої сталі від вмісту вуглецю (б); залежність ударної в'язкості від вмісту різних легуючих елементів (в)

Чинники, що значною мірою впливають на механічні властивості матеріалів — хімічний склад, структура (будова) матеріалів, термічна, термохімічна, термомеханічна та деякі інші види обробки — детально розглядаються у розділі 2.

Контрольні запитання

1. Які чинники впливають на механічні властивості матеріалів?
2. Як впливає на механічні властивості матеріалів підвищення температури? Як впливають низькі температури? Що таке поріг холодноламкості?
3. Що таке повзучість матеріалів? Як позначаються її характеристики?
4. Чим повзучість відрізняється від текучості? Що таке довготривала міцність?
5. Назвіть характеристики жароміцності матеріалів. Що таке жаростійкість?
6. Що таке релаксація напруження?
7. Як впливає на механічні характеристики швидкість навантаження?
8. Що таке наклеп та як він впливає на механічні властивості (а відтак характеристики) металів?
9. Що таке масштабний фактор?
10. Як впливає на механічні характеристики опромінення?

Розділ 2

Будова та властивості металів і сплавів



Глава 3

Будова металів і сплавів

§ 3.1

Характеристика, будова і класифікація металів

Метали — найбільш розповсюджені у природі елементи. Це хімічно прості речовини, які мають особливий (металевий) блиск, високу пластичність, електро- та теплопровідність. У техніці поняття “метал” означає речовину, що має вказані характерні властивості. Цей термін також використовують при визначенні металевих сплавів. За визначенням М. В. Ломоносова, “метали — суть світлі тіла, які кувати можна”.

З позиції хімії метали (їх близько 80) — це елементи, атоми яких складаються з позитивно зарядженого ядра, навколо якого на різній відстані обертаються негативно заряджені електрони, утворюючи певні електронні оболонки. Зовнішня електронна оболонка металів містить невелику кількість електронів (1...2). Сила притягування ядра атома щодо зовнішніх (валентних) електронів значною мірою компенсується електронами внутрішніх оболонок. Тому атоми металів досить легко втрачають зовнішні електрони і перетворюються на позитивно заряджені іони. Вільні електрони легко переміщуються в усіх напрямках між утвореними позитивно зарядженими іонами, нагадуючи рух частинок газу (“електронний газ”). Існування водночас нейтральних й іонізованих атомів та вільних електронів є основою уявлень щодо особливого типу міжатомного зв'язку, притаманного тільки металам, — *металевого*. В металі постійно відбувається обмін електронами між нейтральними та іонізованими атомами, завжди є певна кількість електронів, що на даний момент не належать якомусь з атомів. Якщо створити у металі різницю потенціалів,

рух електронів набуде певного напрямку і виникне електричний струм. Наявністю вільних (колективізованих) електронів пояснюють існування спільних для всіх металів властивостей (пластичність, непрозорість, блиск, високі електро- і теплопровідність), а їх кількістю — різний ступінь “металевості” окремих металів.

Метал як хімічний елемент може бути компонентом, тобто речовиною, яка утворює систему і входить до складу сплавів з двох або кількох елементів.

Властивості металів зумовлює їх атомна будова і кристалічна структура. Залежно від будови і властивостей метали об'єднують у різні групи. За загальною і найбільш поширеною класифікацією метали поділяють на дві групи: чорні і кольорові. До чорних металів відносять залізо та його сплави (сталь, чавун), а до кольорових — решту металів.

Докладніша класифікація (за А. П. Гуляєвим) також поділяє метали на чорні та кольорові.

Чорні метали загалом мають темно-сірий колір, більш високі температури плавлення, значну твердість і щільність, здатні до поліморфних перетворень (крім Ni). Серед них розрізняють залізни — Fe, Co, Ni, Mn; тугоплавкі — температура плавлення яких вища за температуру плавлення заліза (понад 1539 °C) — W, Mo, Re, Nb, Ti, V, Cr; уранові — актиніди; рідкісноземельні (РЗМ) — La, Ce, Nd, Pr та інші. У техніці використовується понад 90 % чорних металів.

До *кольорових* відносять решту металів. Характерним для них є забарвлення (червоне, жовте, біле), висока пластичність, низька твердість, відносно низька температура плавлення, відсутність поліморфізму. Типовим представником групи кольорових металів є мідь і сплави на її основі (бронза, латунь). Серед кольорових металів розрізняють легкі — Be, Mg, Al; благородні — Ag, Au, Pt та метали платинової групи — Pd, Ir, Os, Ru, Rh; “напівблагородні” — Cu; легкоплавкі — Zn, Cd, Hg, Sn, Pb, Bi, Tl, Sb, а також елементи з послабленими металевими властивостями — Ga, Ge.

Кольорові метали додають до складу легированих сталей і сплавів для поліпшення їхньої структури та властивостей, а також використовують для виготовлення різноманітних виробів.

§ 3.2

Атомно-кристалічна структура металів

Під атомно-кристалічною структурою розуміють взаємне розташування атомів (іонів) у реальному кристалі. Залежно від будови (розташування атомів) тверді тіла поділяють на *аморфні* і *кристалічні*.

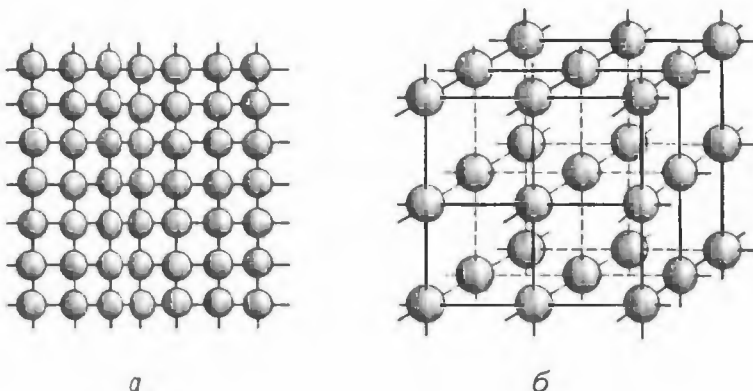


Рис. 3.1

Схема розташування атомів металу у кристалографічній площині (а)
та в просторі кристалічної ґратки (б)

Аморфні характеризуються хаотичним розташуванням атомів. Тому, зберігаючи постійну форму, вони не мають певних (критичних) температур плавлення та кристалізації. Залежно від зовнішніх умов їхні властивості змінюються поступово. Аморфний стан металів реалізується за умов інтенсивного охолодження під час кристалізації.

За звичайних умов тверднення метали у твердому стані мають кристалічну будову. Для кристалічного стану характерно, перш за все, певне закономірне розташування атомів у просторі. Кожен атом (іон) у кристалі оточений певною кількістю найближчих атомів (сусідів), розташованих на однаковій відстані від нього. Розглянемо схему розташування атомів (позитивно заряджених іонів) в одній площині. Уявні лінії, проведені через центри атомів, утворюють ґратку, у вузлах якої знаходяться атоми металу — так звану *кристалографічну площину* (рис. 3.1, а). Багаторазове повторення таких площин у просторі, розташованих паралельно, відтворює просторову *кристалічну ґратку* (рис. 3.1, б). Взаємне розташування у просторі

атомів реальних металів і відстань між ними визначають за допомогою рентгено-структурного аналізу. Розташування атомів у кристалі зручно зображувати у вигляді просторових схем — *елементарних кристалічних комірок*. Під цим розуміється найменший комплекс атомів, що дозволяє відтворити при багатократному повторенні просторову кристалічну ґратку (рис. 3.2).

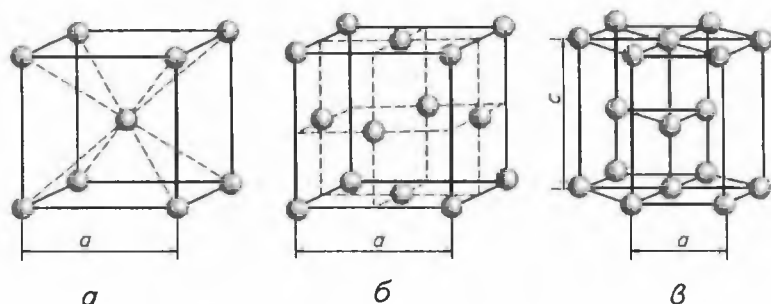


Рис. 3.2

Елементарні кристалічні комірки металів:

а — об'ємноцентрована кубічна (ОЦК); *б* — гранецентрована кубічна (ГЦК);
в — гексагональна щільного пакування (ГЦП)

Просторове розташування атомів у кристалічному тілі залежить від природи металу, характеру міжатомних зв'язків, температури, тиску. Прагнення атомів до найбільш щільного розміщення призводить до значної кількості комбінацій їхнього взаєморозташування. Серед промислових металів найпоширенішим є утворення трьох основних типів кристалічних ґраток: об'ємноцентрованої кубічної (ОЦК), гранецентрованої кубічної (ГЦК) і гексагональної щільного пакування (ГЦП).

У *об'ємноцентрованій кубічній ґратці* (рис. 3.2, *а*) атоми розташовані у вершинах куба і один атом у центрі куба. Таку кристалічну ґратку мають Р, К, Na, Li, Ti_β, Zr_β, Ta, W, V, Fe_α, Cr, Nb, Ba та інші метали.

У *гранецентрованій кубічній ґратці* атоми розташовані у вершинах куба і в центрі кожної грані (рис. 3.2, *б*). Кристалічну ґратку такого типу мають: Ca_α, Ce, Sr_α, Th, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Ir, Fe_γ, Cu, Ca_α та інші метали.

Гексагональну ґратку щільного пакування мають Mg, Ti_α, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Co_β, Be, Ca_β та інші метали. Атоми у ГЦП-ґратці

розташовані у вершинах і центрі шестигранних основ призми та три атоми — у середній площині призми (рис. 3.2, *в*).

Залежно від температури і тиску деякі метали можуть змінювати будову (тип) кристалічної ґратки, тобто існувати у різних кристалічних формах — *поліморфних модифікаціях*. Поліморфну модифікацію, стійку при найнижчій температурі, позначають літерою α , при більш високій — β , далі — γ тощо. Перехід від однієї модифікації до іншої називають *поліморфним перетворенням*. Кожна з модифікацій має свій температурний інтервал існування. За умов рівноваги поліморфне перетворення відбувається при постійній температурі і супроводжується виділенням тепла, якщо перетворення йде при охолодженні, або поглинанням тепла — в разі нагрівання. Для реалізації поліморфного перетворення, як і при кристалізації з рідкої фази, потрібне деяке переохолодження (або перегрів) відносно рівноважної температури. Механізм поліморфного перетворення подібний до кристалізації, що здійснюється шляхом утворення зародків нової фази та їхнього наступного зростання.

Відомі поліморфні перетворення для таких металів: $\text{Fe}_\alpha \rightleftharpoons \text{Fe}_\gamma \rightleftharpoons \text{Fe}_\delta$; $\text{Ti}_\alpha \rightleftharpoons \text{Ti}_\beta$; $\text{Mn}_\alpha \rightleftharpoons \text{Mn}_\beta \rightleftharpoons \text{Mn}_\gamma \rightleftharpoons \text{Mn}_\delta$; $\text{Sn}_\alpha \rightleftharpoons \text{Sn}_\beta$; Ca, Li, Te, Na, Cs, Sr, Zn, РЗМ-металів тощо.

Внаслідок поліморфного перетворення утворюються нові кристалічні зерна іншої форми та розміру. Тому таке перетворення називають *перекристалізацією*. При цьому властивості металів і сплавів змінюються стрибкоподібно.

Основні параметри кристалічних ґраток такі.

Елементарна комірка — це найменша кількість (комплекс) атомів, яка при багаторазовому повторенні у просторі дозволяє побудувати просторову кристалічну ґратку певної системи.

Відрізки дорівнюють відстанням до найближчих атомів (іонів) по координатних осях у тривимірному просторі, позначають їх літерами *a*, *b*, *c*.

Кути між цими відрізками позначають α , β , γ . Співвідношення відрізків і кутів визначає форму комірки.

Період або *параметр ґратки* дорівнює довжині ребра комірки у напрямі головних осей кристалічної ґратки. Параметри ґратки вимірюють у нанометрах (нм), ангстремах (Å).

Координаційне число (K) характеризує щільність пакування ґратки, визначає кількість найближчих і рівновіддалених атомів у певній кристалічній ґратці. Координаційне число простої кубічної ґратки позначають K_6 (літера вказує на тип ґратки, цифра — на кількість

атомів), об'ємноцентрованої кубічної — К8; гранецентрованої кубічної — К12; гексагональної — Г6; гексагональної щільного пакування — Г12.

Базис — це кількість атомів (іонів), що належать до однієї комірки.

Атомний радіус — половина відстані між центрами найближчих атомів у кристалічній ґратці певної кристалічної системи.

Коефіцієнт компактності — це відношення об'єму, що займають атоми (іони), до всього об'єму комірки даного типу.

Для характеристики просторової орієнтації кристалічної ґратки використовують також *індекси площин* та *напрямків* (рис. 3.3). Площини позначають цифрами у круглих дужках, наприклад (100).

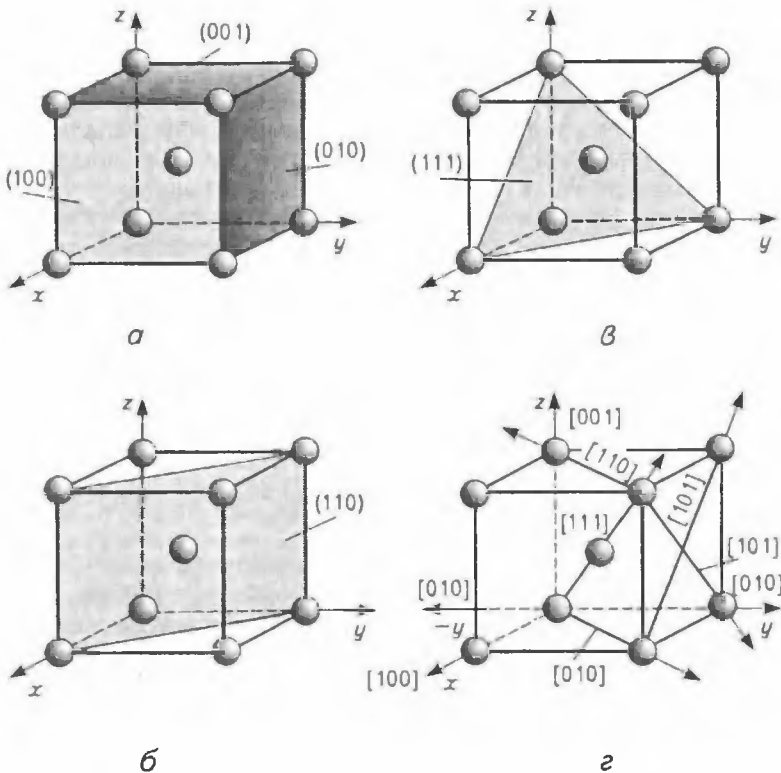


Рис. 3.3

Індекси кристаліграфічних площин (а — в) і напрямків (г)
в об'ємноцентрованій кубічній ґратці (ОЦК)

Сукупності аналогічних площин позначають цифрами у фігурних дужках, наприклад {100}. При позначенні напрямків використовують прямокутні дужки, наприклад [100].

Із спостережень за розташуванням атомів у різних площинах кристалічної ґратки видно, що насиченість цих площин атомами неоднакова. Також різні й відстані між атомами та сили міжатомного зв'язку. Так, в ОЦК-ґратці площині (100) належить лише один атом $[(1/4) \times 4]$, площині (110) — два: один вносять атоми, що знаходяться у вершинах $[(1/4) \times 4]$, і один — атом у центрі куба. У ГЦК-ґратці найщільніше атоми розташовуються у площині (111), а в ОЦК-ґратці — у площині (110).

Це зумовлює різний рівень фізико-механічних властивостей окремих кристалів (монокристалів) у різних площинах і напрямках кристалічної ґратки — так звану *анізотропію*. Це характерна особливість кристалічного тіла на відміну від аморфних з неупорядкованою насиченістю атомами у різних напрямках, тобто ізотропних.

Реальні технічні метали є полікристалами, тобто складаються зі значної кількості по-різному орієнтованих у просторі анізотропних кристалів (зерен). Тому властивості таких полікристалів у всіх напрямках усереднюються і практично не відрізняються. Проте такі технологічні операції, як кування, прокатування, штампування, можуть створювати певну переважаючу орієнтацію зерен і призвести до анізотропії полікристалічного металу.

§ 3.3

Дефекти кристалічної будови металів

Реальні полікристалічні метали завжди мають недосконалості (дефекти) кристалічної будови. Характер і ступінь порушення досконалості кристалічної будови значною мірою визначають властивості металів. Недосконалості будови кристалічної ґратки за геометричними ознаками поділяють на:

- *точкові* (нульвимірні);
- *лінійні* (одновимірні);
- *поверхневі* (двовимірні).

До *точкових дефектів* (невеликі розміри у трьох вимірах) відносять вакансії, міжвузлові та домішкові атоми.

Вакансія — це вузли кристалічної ґратки, в яких атоми відсутні (рис. 3.4, а). На вільне місце у ґратці може переміщуватись інший атом, лишаючи нове вакантне місце. Це сприяє дифузії та само-дифузії металу. Кількість вакансій за кімнатної температури порівняно із загальною кількістю атомів незначна (приблизно одна вакансія на 10^{18} атомів), але дуже зростає при підвищенні температури. Так, при температурі, що майже дорівнює температурі плавлення, одна вакансія припадає вже на 10^4 атомів металу.

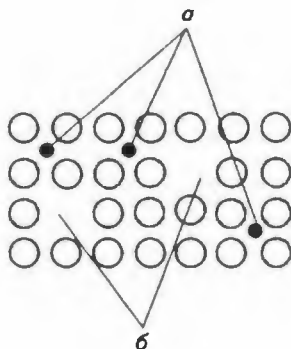


Рис. 3.4

Точкові дефекти у кристалічній ґратці:

а — міжвузлові атоми; б — вакансії

Міжвузлові атоми — це атоми, що вийшли з вузла кристалічної ґратки і зайняли місце у міжвузлях (рис. 3.4, б).

Домішкові атоми — це атоми іншого елемента, які розташовуються у вузлах або міжвузлях кристалічної ґратки металу (сплава).

Точковий дефект розглядають як центр стиснення або розширення у пружному середовищі, що зумовлює викривлення біля нього кристалічної ґратки (рис. 3.5). Точкові дефекти можуть взаємодіяти між собою, утворюючи пари або комплекси різних недосконалостей.

До **лінійних дефектів** відносять такі, що мають невеликі розміри у двох вимірах і значну протяжність у третьому. Це може бути низка вакансій або міжвузлових атомів. Особливим і найважливішим видом лінійної недосконалості є **крайові** і **гвинтові** дислокації (рис. 3.6).

Крайова дислокація — це локалізоване викривлення кристалічної ґратки внаслідок присутності в ній “зайвої” напівплощини (екстраплощини). Край цієї площини утворює дефект ґратки — лінійну (крайову) дислокацію, біля якої виникають пружні викривлення ґратки і відбувається зміщення атомів відносно їх нормальних положень при невеликому дотичному напруженні. У цьому випадку екстраплощина шляхом незначного зміщення перейде у повну площину кристалу, а функції екстраплощини будуть передані сусід-

ній площині. Якщо екстраплощина знаходиться у верхній частині кристала, то дислокацію називають *позитивною* і позначають $\perp$, а якщо у нижній — то *негативною* і позначають τ . Ця відмінність між ними дуже умовна, і якщо перевертати кристал, то позитивна дислокація змінюється на негативну і навпаки. Дислокації однакового знаку відштовхуються, а різного — притягуються. Зближення дислокацій з різним знаком призводить до їхнього взаємознищення.

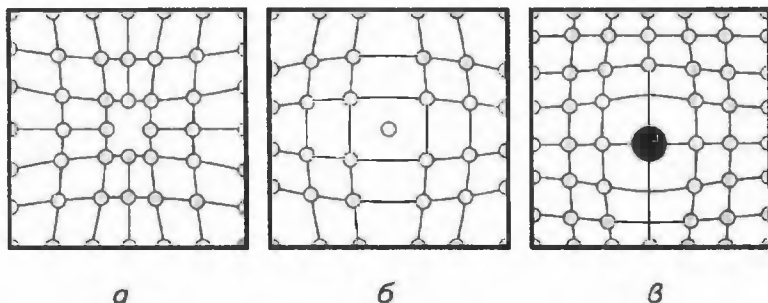


Рис. 3.5

Викривлення кристалічної ґратки біля вакансії (а), дислокованого (б) і домішкового (в) атомів

Порушення порядку розташування атомів може призвести до утворення іншого виду дефекту — *гвинтової дислокації* (див. рис. 3.6, а, б). У цьому випадку кристал можна уявити як такий, що складається з однієї атомної площини, закрученої у вигляді гвинтової поверхні. На відміну від крайової гвинтова дислокація паралельна до вектора зсуву. Розрізняють: • *правосторонні* (за рухом годинникової

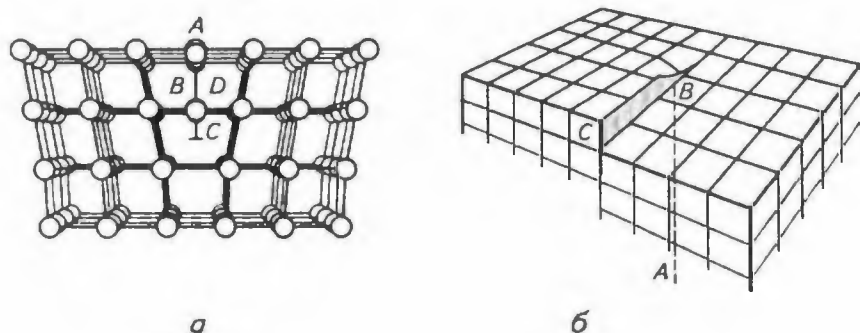


Рис. 3.6

Схеми крайової (а) та гвинтової (б) дислокацій у кристалічній ґратці металу

стрілки) і • *лівосторонні* (проти руху стрілки годинника) гвинтові дислокації.

Нагадаємо, що навколо дислокації утворюється зона викривлення кристалічної ґратки. Енергію викривлення ґратки характеризує так званий вектор Бюргерса, з величиною якого пов'язують здатність дислокації до переміщення.

Важливе значення має характеристика кількості дислокацій — *густина дислокацій*. Це сумарна довжина дислокацій (ΣL), що виражається у сантиметрах на одиницю об'єму (V , см^3), тобто $\rho = L/V$, см^{-2} . У реальних кристалах металів вона становить $\sim 10^6 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ дислокацій. Рухливість їх висока і вони здатні до розмноження під дією зовнішніх зусиль, прикладених до металу. За значної пластичної деформації густина дислокацій зростає до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Густина дислокацій та їхнє розташування значною мірою впливають на властивості металів.

Реальний металевий кристал містить не лише атомно-кристалічні дефекти (вакансії, дислокації), а й структурні недосконалості (блоки, фрагменти, субзерна).

Поверхніві дефекти незначні за розмірами лише в одному вимірюванні — це поверхні розділу між окремими зернами або субзернами у полікристалічному металі (рис. 3.7). Полікристал складається

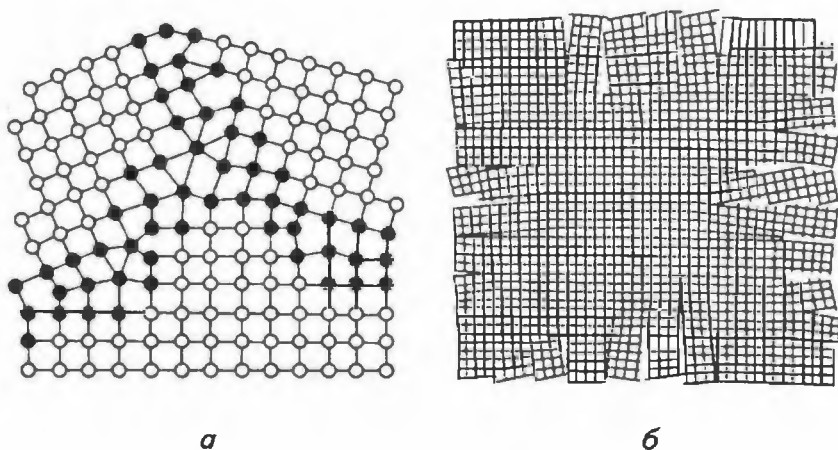


Рис. 3.7

Схеми різної орієнтації у полікристалічному металі (а)
та субзеренної (блочної) структури металу (б)

з великої кількості зерен, кристалічні ґратки яких розорієнтовані (за кристалографічними напрямками) на кути до кількох десятків градусів. Тому границі між зернами називають *великокутовими*. Кожне зерно складається з окремих фрагментів — субзерен, розорієнтованих один від одного на один або кілька градусів. Границі між ними називають *малокутовими*. Субзерна у свою чергу складаються немовби з мозаїки окремих блоків розміром 1000...100 000 Å, кристалографічні площини яких розорієнтовані на невеликий кут — менше 1°.

Така триступінчаста структура не є обов'язковою. Зерна можуть складатись також з фрагментів без внутрішньої блочної структури або лише з блоків. Границі зерен являють собою перехідну зону завширшки до 3...4 міжатомних відстаней, у якій ґратка одного кристала переходить у ґратку іншого, що має іншу кристалічну орієнтацію. Границі зерен і блоків мають порушення закономірності розташування атомів, скупчення дислокацій та домішкових атомів, мають підвищену хімічну активність.

До *об'ємних* дефектів відносять скупчення точкових дефектів, що утворюють пори, а також вкrapлення іншої фази.

§ 3.4

Процеси кристалізації металів

Перехід металу з рідкого стану в твердий з утворенням певного типу кристалічної ґратки та виникненням кристалів називається *кристалізацією*. Процес кристалізації набуває розвитку за умов, коли вільна енергія твердого металу стає меншою за вільну енергію рідкого, тобто коли система переходить у більш стійкий за даних умов стан. Зміна вільної енергії металу у рідкому та твердому станах залежно від температури показана на рис. 3.8. Вільні енергії рідкого й твердого станів з підвищенням температури зменшуються. При досягненні теоретичної температури кристалізації (T_s) вільні енергії рідкого та твердого металу стають однаковими. Кристалізація можлива лише тоді, коли рідкий метал охолодити нижче T_s до так званої *фактичної температури кристалізації* (T_k). Різницю температур $\Delta T = T_s - T_k$ називають *ступенем переохолодження*.

Отже, кристалізація може протікати лише за умови переохолодження розплава нижче рівноважної температури T_s . Процес криста-

лізації можна відобразити графічно в координатах температура — час за допомогою так званих кривих охолодження (рис. 3.9). Спочатку температура металу (у рідкому стані) знижується рівномірно до тем-

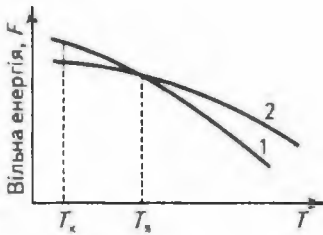


Рис. 3.8

Зміна вільної енергії металу у рідкому (1) і твердому (2) станах залежно від температури

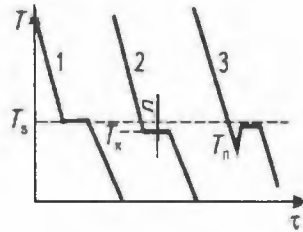


Рис. 3.9

Графіки охолодження при кристалізації:

1 — теоретичний; 2 — реальний процес; 3 — за умов значного переохолодження

ператури кристалізації T_k , яка знаходиться нижче T_s . По досягненні фактичної T_k на кривій охолодження з'являється горизонтальна ділянка, оскільки тепловідбір в оточуюче середовище компенсує виділення прихованої теплоти кристалізації. Після завершення кристалізації температура знову рівномірно знижується. Чим вища швидкість охолодження, тим більший ступінь переохолодження, а відтак нижча температура, за якої відбувається кристалізація. Відповідно до рис. 3.9 процес кристалізації (теоретичний) зображує крива 1, а реальний — крива 2. Розплав безперервно охолоджується до температури переохолодження T_n , яка розміщується нижче температури кристалізації T_k . Охолодження нижче T_s створює енергетичні умови для протікання процесу кристалізації.

Нагадаємо, що у рідкому металі упорядковане розташування атомів розповсюджується лише на невелику відстань і охоплює невелику кількість атомів. Тобто, на відміну від твердого стану з дальнім порядком розташування атомів, зберігається так званий ближній порядок. Такі мікрооб'єми з регулярним розміщенням атомів можуть виникати, існувати деякий час, зникати і утворюватись вже в іншому елементарному об'ємі розплаву. Зі зниженням температури ступінь утворення мікрооб'ємів ближнього порядку, їх розмір і стабільність зростають. За температур, близьких до темпера-

тури плавлення, стає можливим утворення невеликих угруповань, в яких атоми розташовані так само, як і в кристалах. У чистому від домішок розплаві такі найбільш стабільні великі угруповання перетворюються в зародки (центри кристалізації). Такий механізм утворення зародків називають *гомогенним*.

Частіше осередком утворення зародків у розплавах реальних металів слугують найрізноманітніші тверді частки (оксиди, неметалеві вкраплення тощо), які завжди присутні в розплаві. У випадках, коли такі частки мають однакову будову кристалічної ґратки з ґраткою тверднучого металу (ізоморфні домішки) і параметри спряжених ґраток домішки та металу приблизно однакові (різниця не перевищує 9 %), тоді вони виконують роль центрів кристалізації. Таке утворення зародків називають *гетерогенним*.

Процес кристалізації складається з двох елементарних процесів: утворення *зародків* (центрів кристалізації) та *росту кристалів* з цих центрів. Ці процеси мають власні швидкості, які й визначають параметри кристалізації. Перший з параметрів — це швидкість утворення зародків (C), яка визначається кількістю зародків, котрі утворюються в одиниці об'єму за одиницю часу (вимірюється у $\text{см}^{-3}/\text{с}^{-1}$). Другий — це лінійна швидкість росту кристалів (n). Вона характеризує зміну лінійних розмірів кристалів і вимірюється в сантиметрах на секунду ($\text{см}/\text{с}$). Від співвідношення цих параметрів залежать розміри зерен у полікристалічних металах. За теорією Таммана, кількість зерен (N) пропорційна швидкості утворення центрів кристалізації й обернено пропорційна швидкості росту зерна, тобто

$$N = K_n / C,$$

де K_n — сталий коефіцієнт.

Темп зростання кількості зародків у більшості випадків переважає темп зростання лінійної швидкості їхнього росту. Зі зростанням ступеня переохолодження величини параметрів кристалізації збільшуються.

Мінімальний розмір зародка (R_k), здатного до зростання за певних температурних умов, називають *критичним розміром зародка*, а сам зародок — *критичним* або *рівноважним*. Зі збільшенням ступеня переохолодження або зі зниженням температури кристалізації розмір критичного зародка і відповідно розмір зерна зменшуються. В разі гетерогенного утворення центрів кристалізації подрібнення зерна зумовлюється кількістю домішок у металі. Розмір зерна певною мірою впливає на механічні та інші властивості металів.

Дрібнозернистий метал має більш високі характеристики пластичності й в'язкості.

У ливарному виробництві для регулювання розмірів і форми зерен у певних випадках до рідкого металу спеціально вводять тугоплавкі дрібні частки, що слугують додатковими центрами кристалізації. Такі добавки називають *модифікаторами*, а сам процес — *модифікуванням*.

§ 3.5

Дендритна кристалізація і будова металевого зливка

Реальні метали і сплави переходять у твердий стан (кристалізуються) з утворенням, за умов переохолодження і наявності домішок у розплаві, кристалів розгалуженої форми — *дендритів** (рис. 3.10). Характерним для дендритної кристалізації є те, що за-

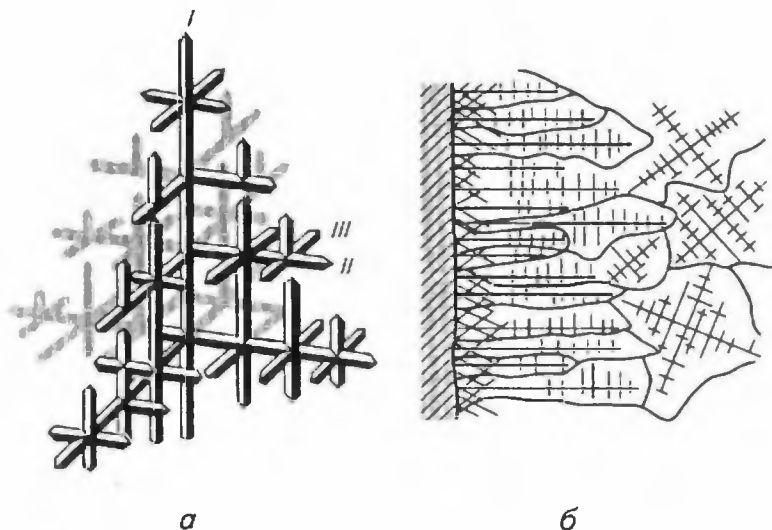


Рис. 3.10

Схема будови дендритного кристалу (а) та росту дендритів за перерізом зливка (б). I—III — порядок осей дендритів

*Дендрит у перекладі з грецької (дендрон) — дерево.

родки ростуть з нерівномірною швидкістю і переважно у напрямках інтенсивного тепловідбору, де швидкість росту максимальна. У цих напрямках формується вісь (або гілка) першого порядку — стовбур майбутнього дендритного кристалу. Подальше збільшення розмірів осі першого порядку відбувається не лише за довжиною, а й за перерізом зростаючого кристалу. Внаслідок цього вісь завтовшки більша в основі та менша біля вістря. З часом від осей першого порядку під певним кутом починають рости нові гілки — осі другого, третього, четвертого та інших порядків. Зі зростанням гілок високих порядків заповнюються всі проміжки, які займає рідкий метал. Внаслідок нерівномірної кристалізації зерен дендритної форми у різних місцях дендрита хімічний склад неоднаковий. Таку неоднорідність складу в межах одного дендритного кристалу називають *дендритною ліквіацією*.

За виробничих умов при охолодженні великих мас металу у формах (виливницях) тверднення не може відбуватися водночас по всьому об'єму зливка. Воно починається у зонах найбільшого відведення тепла (стінки і дно виливниці) і розповсюджується до середини форми. Різний ступінь переохолодження металу в об'ємі зливка, наявність домішок, температурно-часові параметри кристалізації та охолодження металу зумовлюють неоднорідність макроструктури, форми і розмірів зерен, хімічного складу, наявність макро- і мікронесуцільностей у металі зливка.

Макроструктура сталевих зливок складається з трьох основних зон (рис. 3.11):

- дрібних рівноосних кристалів;
- великих орієнтованих (стовпчастих);
- рівноосних різно орієнтованих кристалів.

Зовнішня зона 1 розповсюджується на невелику глибину. Дрібні рівноосні кристали утворюються за умов значного переохолодження металу при контакті розплаву з холодними стінками виливниці. При цьому виникає значна кількість центрів кристалізації.

Зона 2 утворена досить великими стовпчастими кристалами, що ростуть перпендикулярно стінкам і дну виливниці, тобто у напрямку, протилежному відведенню тепла від розплаву.

Центральна зона 3 зливка складається з різних за розміром і орієнтацією рівноосних кристалів.

Кристалізація зливка з утворенням різних структурних зон зумовлює наявність макроскопічної ліквіації (зональної). Найбільше домішок скупчується у центральній та верхній частинах зливка. Слід відзначити також зменшення об'єму твердого металу порівняно з рідким (усадка). Це зумовлює утворення несучільностей у вигляді

зосередженої раковини усадки, або зони дрібних раковин, порожнин, мікропор. Найбільш негативно на структуру і властивості металу впливає раковина усадки, поблизу якої сконцентрована найбільша кількість шкідливих домішок.

Частина зливка, де знаходяться раковина усадки, усадкова рихлота та ліквацийна зона, є дефектною частиною (частиною надливу).

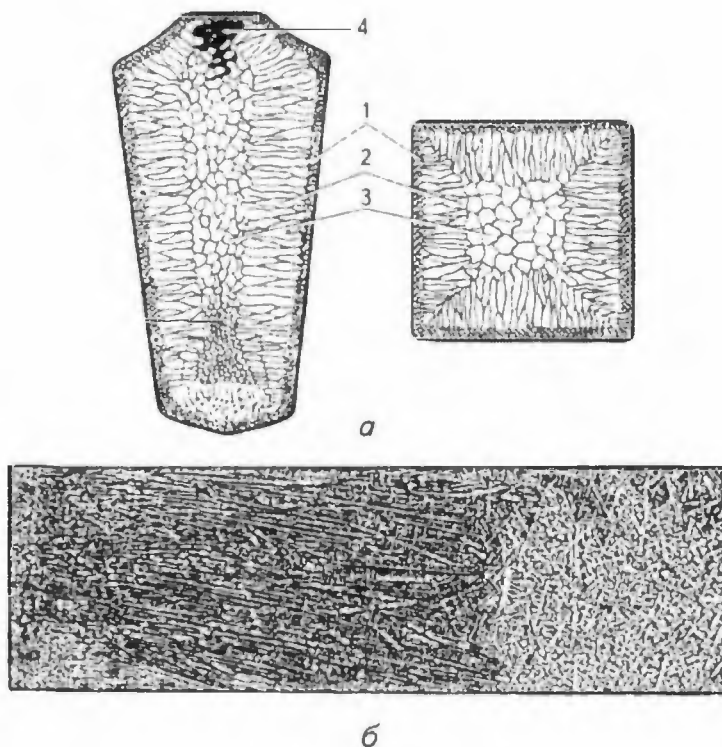


Рис. 3.11

Будова (а) та мікроструктура (б) сталевого зливка:

1 — зона дрібних неорієнтованих кристалів біля стінки виливниці; 2 — зона стовпчастих, витягнутих до центра зливка, кристалів; 3 — зона рівноосних кристалів; 4 — раковина усадки

Тому при подальшій обробці тиском ця частина (15...25 %) видаляється і надходить на переплав. Дрібні несучільності, якщо їхні стінки не окислились, усувають обробкою тиском (прокатування, кування тощо). Структурні й хімічні неоднорідності литого металу

певною мірою усувають при наступній термічній обробці. Для сталевих виливків найбільш розповсюджені два варіанти термічної обробки: нормалізація та нормалізація з наступним відпуском. Термічна обробка у більшості випадків є обов'язковою операцією технологічного процесу одержання литих виробів.

§ 3.6

Основи теорії сплавів

Сплав — це речовина, яку одержують поєднанням (сплавленням, спіканням, електролізом) двох або більше елементів. Однак, зазвичай, сплави одержують шляхом розплавлення двох або більше елементів (металів або неметалів) з наступною їхньою кристалізацією (твердненням).

Структура і властивості сплавів значною мірою відрізняються від структури і властивостей елементів, що їх утворюють. Сплав, виготовлений переважно з металів, який має металеві властивості, називають *металевим сплавом*. Порівняно з чистими металами сплави мають більш цінний комплекс механічних, фізичних і технологічних властивостей. Залежно від кількості елементів (компонентів), що входять до складу розплаву, розрізняють двокомпонентні, трикомпонентні або багатокомпонентні сплави (системи). У розплаві всі компоненти сплаву знаходяться в атомарному стані, утворюючи рідкий однорідний розчин із статистично однаковим хімічним складом. Під час тверднення (кристалізації) атоми компонентів розташовуються у певному порядку, утворюючи кристалічну речовину — сплав. *При цьому існує три типи взаємодії компонентів сплаву:*

- утворення механічної суміші компонентів;
- утворення хімічних сполук;
- утворення твердих розчинів.

У разі формування *механічної суміші* компонентів сплаву атоми кожного з компонентів утворюють власні кристалічні ґратки, тобто кожний елемент кристалізується самостійно. Механічну суміш, яку утворюють два компоненти, що нездатні взаєморозчинюватись або утворювати хімічну сполуку при кристалізації з рідкого стану, називають *евтектикою*. Структура сплавів такого типу (Sn — Zn, Sb — Pb) неоднорідна (гетерогенна). Слід очікувати, що властивості

цих сплавів будуть усередненими, виходячи з рівня властивостей компонентів та їхнього кількісного вмісту у сплаві.

Утворення хімічної сполуки при кристалізації зумовлено здатністю різнорідних атомів (які значною мірою відрізняються за будовою і властивостями) об'єднуватись у певній пропорції, утворюючи новий тип кристалічної ґратки, що відрізняється від ґраток компонентів сплаву. При цьому утворюється речовина з новими властивостями, для якої характерно: чітке співвідношення кількості атомів елементів, що її утворюють $A_n B_m$ (наприклад, Fe_3C , Fe_2O_3); наявність власного типу кристалічної ґратки; певна (постійна) температура плавлення; суттєва відмінність у властивостях порівняно з вихідними елементами; стрибкоподібна зміна властивостей при зміні хімічного складу (сингулярність).

Якщо ж при переході сплаву з рідкого стану в твердий зберігається однорідність і розчинність елементів, що його утворюють, такий сплав називають **т в е р д и м р о з ч и н о м**. При утворенні твердого розчину один з елементів зберігає власну кристалічну ґратку (розчинник), а інші у вигляді окремих атомів розподіляються у його кристалічній ґратці. Залежно від характеру їх розміщення в ґратці розчинника розрізняють тверді розчини заміщення й тверді розчини втілення (рис. 3.12). Утворення відповідного виду твердого розчину пов'язане з типом кристалічної ґратки та співвідношенням атомних радіусів компонентів.

При утворенні **т в е р д и х р о з ч и н і в** заміщення атоми компонента, що розчиняється, заміщують частину атомів розчинника у вузлах його кристалічної ґратки. Коли компоненти заміщують один одного у кристалічних ґратках у будь-яких кількісних співвідношеннях, то утворюється безперервна низка твердих розчинів. Таку необмежену розчинність (здатність утворювати тверді розчини при будь-яких пропорціях компонентів) мають лише метали з кристалічною ґраткою одного типу за умови, що параметри їхніх ґраток відрізняються не більше ніж на 8...15 %. Проте допустимі відміни в параметрах для різних пар металів різні. Так, необмежені тверді розчини у сплавах на основі заліза можуть утворюватись за умови, що атомні діаметри елементів, які розчинюються, відрізняються від заліза не більше ніж на 8 %. Якщо різниця атомних діаметрів більше 8 %, на основі заліза утворюються лише обмежені тверді розчини.

Взаємодію елементів у сплавах і характер структури зумовлює фізична природа елементів, тобто тип кристалічної ґратки, розташування елементів у періодичній системі Д. І. Менделєєва тощо.

Дійсно, метали, розташовані поблизу один від одного у таблиці Д. І. Менделєєва, мають необмежену розчинність: Cu(29) і Ni(28); Fe(26) і Ni(28); Fe(26) і Cr(24); Fe(26) і Co(27); Co(27) і Ni(28), або розташовані в одній групі: As(33) і Sb(51); Au(79) і Ag(47); Au(79) і Cu(29); Bi(83) і Sb(51) (цифри у дужках означають номер елемента).

Елементи з кристалічними ґратками різного типу, якщо їхні атоми близькі за розмірами, можуть розчинюватись один в одному обмежено. Чим більша різниця в розмірах атомів компонентів, тим менше вони розчинюються у твердому стані.

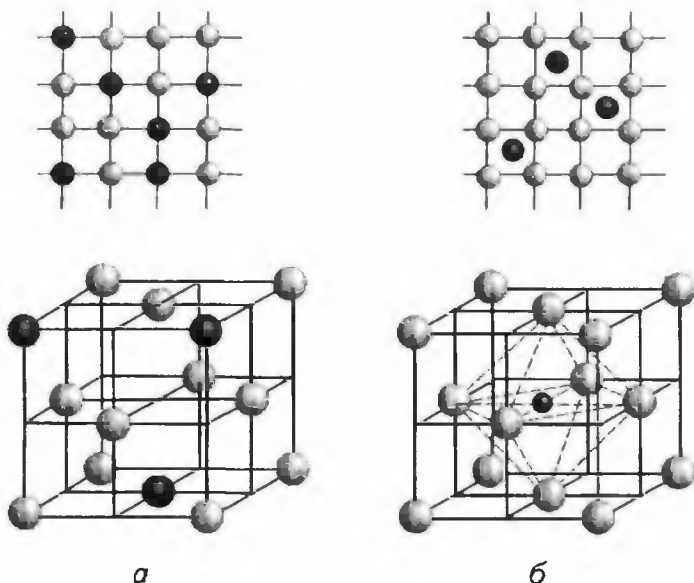


Рис. 3.12

Схема розташування атомів у твердих розчинах заміщення (а) та втілення (б):

○ — атоми розчинника; ● — атоми розчинюваного елемента

Обмежена розчинність компонентів характерна також при утворенні ними твердих розчинів втілення, тобто таких, коли атоми розчинених компонентів розташовуються (втілюються) у міжвузельних об'ємах метала-розчинника. При цьому атоми розміщуються не в будь-якому міжвузлі, а лише в тих, де для них достатньо вільного об'єму. Ці пустоти малі за розміром, у них можуть розміститись елементи, атоми яких мають відповідні невеликі розмі-

ри (водень, азот, вуглець, бор). Вміст їх у твердому розчині втілення не перевищує 1...2 %. Тобто такі сплави є твердими розчинами з обмеженою розчинністю компонентів.

Утворення твердих розчинів (заміщення, втілення) супроводжується зміною параметрів кристалічної ґратки метала-розчинника залежно від співвідношення розмірів атомів компонентів і відповідним зміцненням сплаву. Зміцнення пропорційне відносній зміні параметра ґратки, причому зменшення параметра призводить до більш суттєвого зміцнення, ніж його збільшення.

Властивості сплавів, що утворюють тверді розчини, відрізняються від властивостей елементів-компонентів. Проте сплави зберігають основні властивості металів, а саме: здатність до пластичної деформації, електропровідність тощо.

Відзначимо також, що на відміну від механічної суміші твердий розчин є однорідним (однофазним), складається з одного виду кристалів, має одну (певну) кристалічну ґратку; на відміну від хімічної сполуки твердий розчин існує не за строго визначеного співвідношення компонентів, а в інтервалі концентрацій.

У металознавстві чисті компоненти позначають латинськими літерами *A, B, C*, а тверді розчини — грецькими літерами α, β, γ тощо.

§ 3.7

Діаграми стану сплавів

Важливо знати стан і структуру сплавів залежно від зміни температури і концентрації компонентів, що їх утворюють. Такий зв'язок наочно відображають *діаграми стану сплавів*, які будують на основі результатів експериментів з використанням методів термічного, магнітного, металографічного та інших аналізів. Найчастіше для цього використовують метод термічного аналізу, який базується на тому, що будь-які зміни в стані металу або сплаву (фазові та структурні перетворення) супроводжуються певними тепловими ефектами. Так, під час плавлення твердих кристалічних тіл тепло поглинається, а при кристалізації воно виділяється.

Температури, при яких відбуваються зміни стану (перетворення) сплаву, називають *критичними*: $T_{\text{пл}}$ — температура плавлення; $T_{\text{кр}}$ — температура кристалізації тощо. Для побудови діаграм стану необхід-

но знати критичні температури сплаву. Визначають їх на основі аналізу швидкостей охолодження (нагрівання), графічно зображених у координатах “температура — час” (рис. 3.13).

При охолодженні аморфного тіла його температура буде поступово і безперервно знижуватись. Це означає, що перехід з рідкого стану в твердий для аморфного тіла є поступовим, і конкретна температура плавлення не фіксується (рис. 3.13, крива *а*).

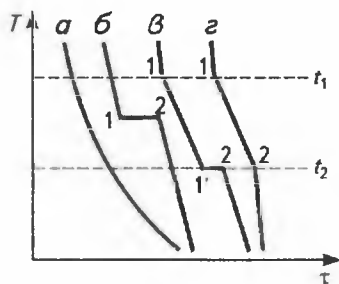


Рис. 3.13

Графіки охолодження при твердненні аморфного тіла (*а*), чистого металу (*б*), сплаву з евтектикою (*в*), сплаву з утворенням твердого розчину (*г*); t_1 , t_2 — температури початку і кінця кристалізації сплавів

Кристалічні речовини (метали, сплави) мають певну фіксовану температуру плавлення (при нагріванні) та кристалізації (при охолодженні). Кристалізація (тверднення) чистих металів (рис. 3.13) відбувається за постійної температури, а сплавів — в інтервалі температур. Початок і кінець цього інтервалу температур визначають точки перегину на графіку охолодження, які характеризують зміну швидкості охолодження розплаву (початок і кінець перетворення) і відповідають критичним температурам (точкам) металу або сплаву. Виділення внутрішньої теплоти кристалізації призводить до зменшення швидкості охолодження сплаву (утворення твердого розчину) або тимчасової зупинки спаду температури (утворення механічної суміші, хімічної сполуки).

Побудова діаграм стану сплавів базується на експериментальному одержанні серії графіків охолодження розплавів з різним (заданим) співвідношенням (вмістом) компонентів системи та визначення за ними критичних температур (точок) фазових перетворень. Температури початку кристалізації сплаву називають *точками ліквідус* (від лат. liquidus — рідкий), а закінчення кристалізації — *солідус* (від лат. solidus — твердий). Обладнання для термічного аналізу складається з нагрівальної та контролюючої температури апаратури. Для побудови діаграми стану на осі абсцис відкладають концентрацію (вміст) компонентів досліджуваних сплавів (рис. 3.14). Крайня точка ліворуч по осі концентрації відповідає 100 % компонента *A* і 0 % *B* (початок осі абсцис), а крайня точка праворуч відповідає 100 % компонента *B*

і 0 % компонента A . Значення температури відкладають по осі ординат. У цих координатах будують графіки охолодження чистих компонентів та сплавів на їхній основі. З'єднуючи всі точки початку кристалізації на кривих охолодження в одну лінію, а всі точки кінця кристалізації в іншу — одержують основні лінії (відповідно ліквідус і солідус) діаграми стану сплавів системи $A - B$. Вище лінії ліквідус

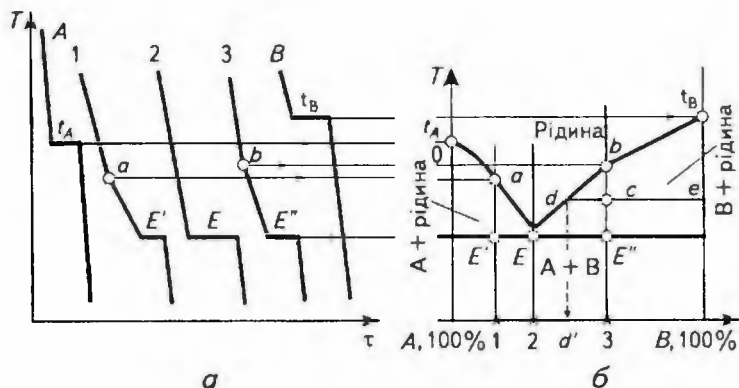


Рис. 3.14

Схема побудови діаграми стану двокомпонентної системи ($A - B$) з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані і нерозчинних у твердому:

- a — графіки охолодження, одержані методом термічного аналізу;
 $б$ — діаграма фазової рівноваги компонентів A і B

сплави перебувають в рідкому стані, нижче лінії солідус — у твердому, а у межах між ними водночас існують рідка і тверда фази.

Сплави з різним вмістом компонентів A і B мають різний фазовий склад, структуру, а отже, і властивості. Діаграми стану дають уявлення про формування структури і фазового складу будь-якого сплаву даної системи залежно від: концентрації компонентів, температури, швидкості охолодження; дозволяють простежити зміни (за певних умов) певних фізичних і механічних властивостей.

Перш ніж розглядати діаграми стану, слід визначити та уточнити деякі терміни і поняття.

Система — це сукупність металів або металевих сплавів, обраних для спостереження впливу на них певних факторів (температури, тиску, концентрації). Систему називають рівноважною, якщо перетворення в ній при нагріванні та охолодженні відбуваються зворотно,

а рівноважні умови досягаються за незначних ступенів перегріву чи переохолодження.

Компонент — незалежна складова частина системи (сплаву). Компонентами можуть бути чисті метали (елементи) або стійкі хімічні сполуки. У металознавстві під компонентами зазвичай розуміють елементи (метали і неметали), які утворюють сплав. Отже, чисті метали — це однокомпонентні системи, сплави з двох елементів — двокомпонентні системи і т. д. Кількість компонентів позначають літерою K .

Фаза — це хімічно однорідна частина системи, відокремлена від інших частин (фаз) поверхнею розділу. У сплавах фазами можуть бути чисті метали, рідкі або тверді розчини, хімічні сполуки. Фази відрізняються одна від одної за: • агрегатним станом; • хімічним складом; • типом кристалічної ґратки. Кількість співіснуючих у сплаві фаз позначають літерою Φ .

Число ступенів свободи визначає кількість незалежних перемінних (температура, концентрація, тиск), які, не порушуючи рівноваги системи, можна змінювати у певних межах. Рівноважним називають такий стан сплаву, що не змінюється у часі. При рівновазі зберігається й кількість співіснуючих фаз. Якщо за таких умов можна змінювати лише температуру (одна перемінна), то число ступенів свободи дорівнює одиниці; якщо температура і склад фази будуть постійними, число ступенів свободи дорівнюватиме нулю. Число ступенів свободи позначають літерою S .

Закономірності всіх змін системи, залежно від внутрішніх і зовнішніх умов, підпорядковані *правилу фаз Гіббса*. Цей математичний вираз умов рівноваги системи визначає залежність між кількістю фаз, компонентів і числом ступенів свободи системи:

$$S = K + V - \Phi,$$

де S — число ступенів свободи; K — кількість компонентів; V — зовнішні перемінні фактори (температура, тиск); Φ — кількість фаз.

Якщо прийняти тиск постійним, то для металевих систем $V = 1$, тобто із зовнішніх перемінних факторів слід враховувати лише температуру:

$$S = K + 1 - \Phi.$$

Розглянемо можливі умови рівноваги для однокомпонентних систем. У такій системі, наприклад у чистому металі, коли є лише одна фаза (розплав або твердий метал), $K = 1$ і $\Phi = 1$. Тоді

$$S = 1 + 1 - 1 = 1,$$

гобто система має один ступінь свободи. Це означає, що метал можна охолоджувати або нагрівати, зберігаючи його однофазним (рідким або твердим) лише за певного інтервалу температур.

У момент плавлення або кристалізації в однокомпонентній системі існують вже дві фази — наприклад рідкий і твердий метал. Тоді $K = 1$, $\Phi = 2$, тобто

$$C = 1 + 1 - 2 = 0.$$

У цьому випадку система не має жодного ступеня свободи і рівновага можлива тільки при постійній температурі. Дійсно, тверднення чистих металів відбувається за постійної температури і на кривій охолодження (нагрівання) їй відповідає горизонтальна ділянка (плошадка).

У двокомпонентних системах сплав кристалізується за інших умов, оскільки $K = 2$, $\Phi = 2$, тобто

$$C = 2 + 1 - 2 = 1.$$

Система має одну перемінну — один ступінь свободи і рівновага між рідкою та твердою фазами при кристалізації зберігається в інтервалі температур. Для цього на кривій охолодження з'являються точки (температури) початку й кінця кристалізації сплаву. Наявність інтервалу кристалізації є важливою особливістю, що характерна для кристалізації сплавів.

§ 3.8

Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів

Діаграми стану сплавів графічно показують залежність стану сплавів даної системи від концентрації (хімічного складу) та температури. Вони дозволяють визначити не лише температури кристалізації та плавлення, а й визначити, які саме перетворення можуть відбуватись у сплавах за різних температур, тобто характеризують стан сплаву.

Розглянемо діаграми стану в загальному вигляді для пар компонентів, які умовно позначимо A і B . Залежно від взаємодії металів A і B у твердому стані вони утворюють діаграми стану різних типів.

1. Діаграма стану сплавів, компоненти яких необмежено розчинні в рідкому стані та практично не розчинні у твердому.

До таких сплавів відносять, наприклад, сплави систем $Pb - Sb$, $Sn - Zn$. У твердому стані вони утворюють механічну суміш кристалів компонентів. Така суміш, якщо вона закристалізувалась з рідини за температури нижчої від температур плавлення компонентів сплаву, називається *евтектикою*, або евтектичною сумішшю (*eutectos* — з грецької означає легкоплавкий). Сплави хімічного складу, при якому кристалізується лише евтектика (точка E діаграми), називають *евтектичними*. Сплави, що за складом розташовані на діаграмі ліворуч від евтектичного, називають *доевтектичними*, а праворуч — *заевтектичними*.

Розглянемо діаграму стану першого типу (див. рис. 3.14). Якщо два компоненти у твердому стані нерозчинні один в одному (утворюють механічну суміш), добавка одного компонента до іншого знижує температуру початку тверднення (лінія ліквідус на діаграмі). Температура ж закінчення тверднення (лінія солідус) не залежить від складу сплаву даної системи і однакова для всіх сплавів, утворених даною парою компонентів. На відміну від чистих компонентів, які кристалізуються при постійній температурі, початок кристалізації сплавів, наприклад 1 і 3 (рис. 3.14, б), визначається перегином кривих охолодження. При температурах точок a і b у розплаві утворюються кристали A (у сплаві 1) і B (у сплаві 3). Нижче точок a і b рідина пересичена відповідно компонентами A і B . При цьому їх вміст у рідині знижується. Так, при охолодженні сплаву 1 в інтервалі aE' у розплаві зменшується кількість A по лінії aE і при температурі точки E' вона досягає складу точки E діаграми. Таким же чином і розплав сплаву 3 , збіднюючись при охолодженні компонентом B , досягає за складом тієї самої точки E при охолодженні його до температури точки E'' . В обох випадках розплави сплавів 1 і 3 при охолодженні до температур E' і E'' стають насиченими компонентами A і B . Вони виділяються з рідини водночас при остаточній кристалізації, утворюючи суміш $A + B$ (евтектику). Евтектичне перетворення відбуватиметься для кожного із сплавів даної системи: у доевтектичному (сплав 1) при температурі точки E' , а у заевтектичному (сплав 3) — при температурі точки E'' . Для сплаву евтектичного складу (сплав 2) первинні кристали A чи B з рідкої фази не виділяються і при температурі E кристалізуються одразу у вигляді суміші $A + B$, тобто твердий сплав на 100 % складатиметься з евтектики.

Структура доевтектичного сплаву 1 складається з первинних кристалів компонента A і евтектики $A + B$ у співвідношенні за об'ємом 50 : 50 % (за правилом відрізків). Структура евтектичного сплаву 2 на 100 % складається з евтектичної суміші $A + B$. Сплав 3

(заевтектичний) має структуру, що складається з кристалів компонента B і евтектики $A + B$ при їхньому об'ємному співвідношенні 50 : 50 %.

Склад і кількість кожної фази у будь-якій двофазовій області діаграми стану дозволяє визначити *правило відрізків*. Для визначення вмісту компонентів у фазах сплаву, на діаграмі стану проводять горизонтальну лінію (коноду) до перетину з лініями, що обмежують цю область. Проекції точок перетину коноди з лініями діаграми на вісь концентрації показують склад фаз. Так, для сплаву 3 (див. рис. 3.14) при температурі точки c рідина за своїм складом відповідає точці d' на осі абсцис.

Для визначення кількісного співвідношення фаз визначають довжину відрізків коноди від заданої точки діаграми до точок, що відповідають складу фаз. Довжини цих відрізків обернено пропорційні кількостям фаз.

Наприклад (рис. 3.14), у сплаві 3 при температурі точки c кількість рідини пропорційна відрізку ce і становить 70 %, а кількість первинних B -кристалів пропорційна відрізку dc і дорівнює 30 %.

2. Діаграма стану сплавів, які утворюють у твердому стані кристалічні тверді розчини з необмеженою взаємною розчинністю компонентів. У процесі охолодження таких сплавів з розплаву випадають кристали твердого розчину з різним співвідношенням компонентів. Верхня крива m (рис. 3.15) — ліквідус, нижня n — солідус. Внаслідок

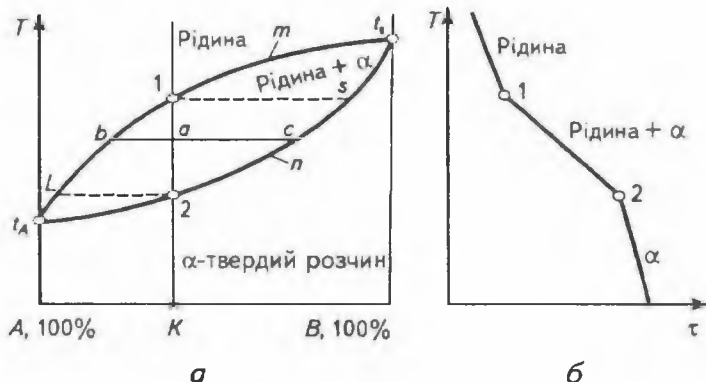


Рис. 3.15

Діаграма стану (а) та крива охолодження (б) сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому і твердому станах

процесів дифузії концентрація сплаву вирівнюється (найактивніше — при повільному охолодженні). Прикладом таких сплавів може слугувати система сплавів $\text{Cu} - \text{Ni}$.

3. Діаграма сплавів, компоненти яких утворюють тверді розчини з обмеженою розчинністю. Така діаграма характерна, наприклад, для системи сплавів $\text{Cu} - \text{Ag}$ (рис. 3.16). Крива AEB — ліквідус, крива $ADECB$ — солідус. Кристали твердого розчину втілення атомів компонента B у кристалічній ґратці компонента A (α -твердий розчин) випадають при температурах відповідно лінії AD . При температурах і концентраціях компонентів, що відповідають лінії CB , кристалізуються тверді розчини втілення атомів компонента A у кристалічній ґратці компонента B (β -твердий розчин). Сплав, склад якого відповідає точці E на діаграмі, кристалізується з утворенням евтектики ($\alpha + \beta$). Сплави між точками D і C після кристалізації з розплаву складаються з кристалів α -твердого розчину і евтектики ($\alpha + \beta$), а між точками C і E — з кристалів β -твердого розчину і евтектики ($\alpha + \beta$). Сплави з вмістом компонента B , меншим ніж у точці D , закінчують кристалізацію по лінії AD і складаються з кристалів α . При зниженні температури (лінії DF) ці кристали стають пересиченими щодо компонента B , тому з твердого α -розчину утворюються кристали $\beta_{\text{вт}}$ -твердого розчину. Таку кристалізацію з твердого розчину називають *вторинною*, а з рідкого розчину — *первинною*. У сплавах з вмістом

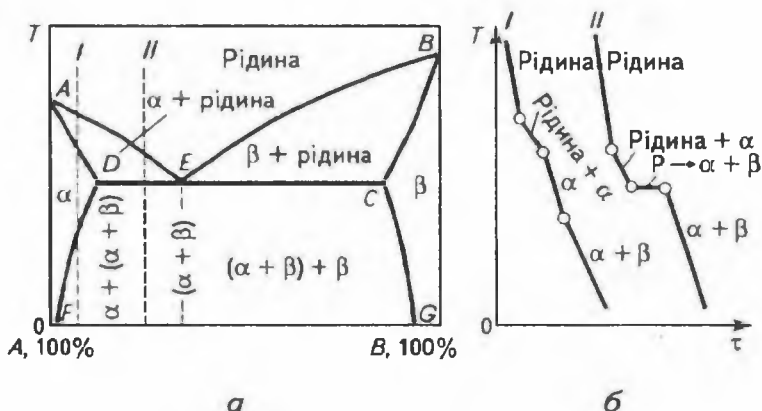


Рис. 3.16

Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (а) та криві охолодження (б)

компонента B більшим ніж у точці E , при температурах нижчих лінії EC , з кристалів твердого β -розчину утворюються кристали $\alpha_{\text{вт}}$.

4. **Діаграма стану сплавів з утворенням хімічної сполуки.** Такий тип діаграми (рис. 3.17) характерний, наприклад, для сплавів системи $\text{Mg}-\text{Ca}$. Хімічну сполуку A_nB_m (Mg_4Ca_3) можна розглядати як третій

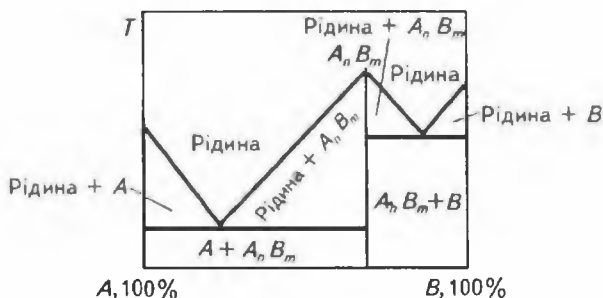


Рис. 3.17

Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічну сполуку

компонент, що поділяє діаграму стану системи $A-B$ ($\text{Mg}-\text{Ca}$) на дві діаграми першого типу: системи $A-A_nB_m$ ($\text{Mg}-\text{Mg}_4\text{Ca}_3$) та A_nB_m-B ($\text{Mg}_4\text{Ca}_3-\text{Ca}$).

§ 3.9

Зв'язок між типом діаграми стану та властивостями сплавів

Визначення зв'язку властивостей сплавів з типом діаграми стану є важливою передумовою для створення нових сплавів і прогнозування їхніх властивостей. Такий зв'язок вперше досліджено М. С. Курнаковим. Так, на рис. 3.18 показані зміни властивостей залежно від типу діаграми стану двокомпонентних систем.

Властивості сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані, що утворюють механічні суміші у твердому, змінюються за прямолінійним законом (рис. 3.18, *а*). Тому створити сплав у цій системі, механічні і електричні властивості якого б перевищували властивості вихідних компонентів, неможливо.

У разі утворення компонентами необмежених твердих розчинів властивості сплавів змінюються нерівномірно, за криволінійним законом (рис. 3.18, б), і можуть значно відрізнятись від властивостей вихідних компонентів.

У сплавах з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані властивості змінюються відповідно приналежності сплаву до певної частини діаграми стану (рис. 3.18, в).

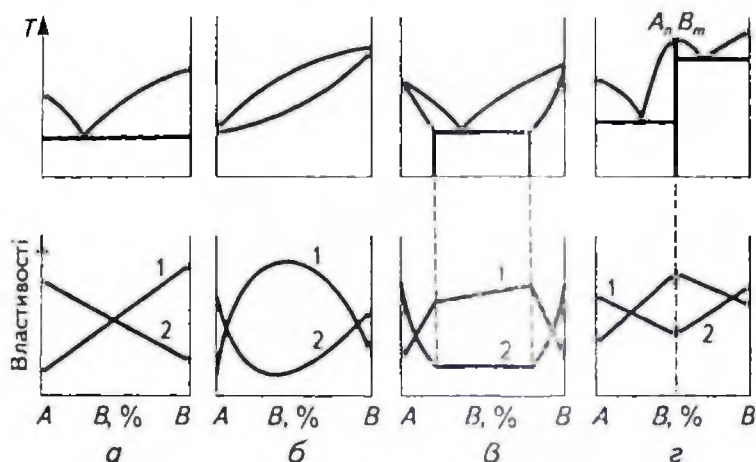


Рис. 3.18

Діаграми стану та властивостей сплавів (за М. С. Курнаковим):

1 — твердість; 2 — електропровідність

Утворення в системі хімічних сполук (рис. 3.18, г) супроводжується стрибкоподібною зміною властивостей сплавів. Точка перелому на діаграмі стану відповідає утворенню хімічної сполуки.

Отже, показано, що між станом сплавів та їхніми властивостями існує певний зв'язок. Проте описані залежності зміни властивостей від типу діаграми стану — це лише наближена схема, що не завжди підтверджується експериментом. У ній не враховується форма та розмір кристалів, їхнє взаєморозташування, температура та інші фактори, що значною мірою впливають на властивості сплавів будь-якої системи.



Контрольні запитання

1. Що таке метали, як їх класифікують?
2. Яка різниця між кристалічним і аморфним тілом?
3. Які параметри характеризують кристалічну ґратку?
4. Які типи кристалічних ґраток характерні для металів?
5. Що таке поліморфізм металів?
6. Чим відрізняється ідеальна та реальна будова металевих кристалів?
7. Які основні дефекти кристалічної будови металів?
8. Що таке кристалізація, як відбувається цей процес?
9. Що таке критичний зародок кристалізації?
10. З яких основних зон складається макроструктура зливка?
11. Що таке сплав, система, компонент?
12. За якими принципами будуються діаграми стану?
13. Що таке твердий розчин, механічна суміш, хімічна сполука?
14. Які основні типи діаграм стану двокомпонентних сплавів?
15. Який зв'язок існує між типом діаграми і властивостями сплавів?

Глава 4

Залізовуглецеві сплави

§ 4.1

Діаграма стану системи залізо — вуглець

Залежно від вмісту вуглецю залізовуглецеві сплави поділяють на сталі (до 2 % С) і чавуни (більше 2 %). Діаграма стану системи Fe — С графічно зображує фазовий стан залізовуглецевих сплавів залежно від вмісту вуглецю та температури за умови дуже повільного їх охолодження або нагрівання. Основою для побудови такої діаграми (рис. 4.1) є дослідження Д. К. Чернова, пов'язані з відкриттям критичних температур (точок), що залежать від вмісту вуглецю у сплаві, а також уявлень щодо закономірності зміни при певних температурах структурного стану і властивостей залізовуглецевих сплавів. Діаграму стану системи Fe — С використовують у теорії та практиці термічної обробки сталей і чавунів.

Діаграма Fe — С (рис. 4.1) показана лише для інтервалу концентрації вуглецю від 0 до 6,67 %, тобто до утворення хімічної сполуки Fe₃C (цементит). Лише ця частина діаграми має практичне значення, оскільки сплави з більш високим вмістом вуглецю дуже крихкі. По осі абсцис на діаграмі показано концентрацію вуглецю в масових частках (мас. %), а по осі ординат — температуру в градусах Цельсія (T, °C). Якщо розглядати Fe₃C як компонент, то для переведення концентрації вуглецю в концентрацію цементиту вміст вуглецю слід помножити на 15.

При охолодженні залізовуглецевих сплавів вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти із залізом, утворюючи Fe₃C, але й виділятися у вільному стані у вигляді графіту. Тому розрізняють дві діаграми стану: залізо — цементит (Fe — Fe₃C) і залізо — графіт (Fe — C).

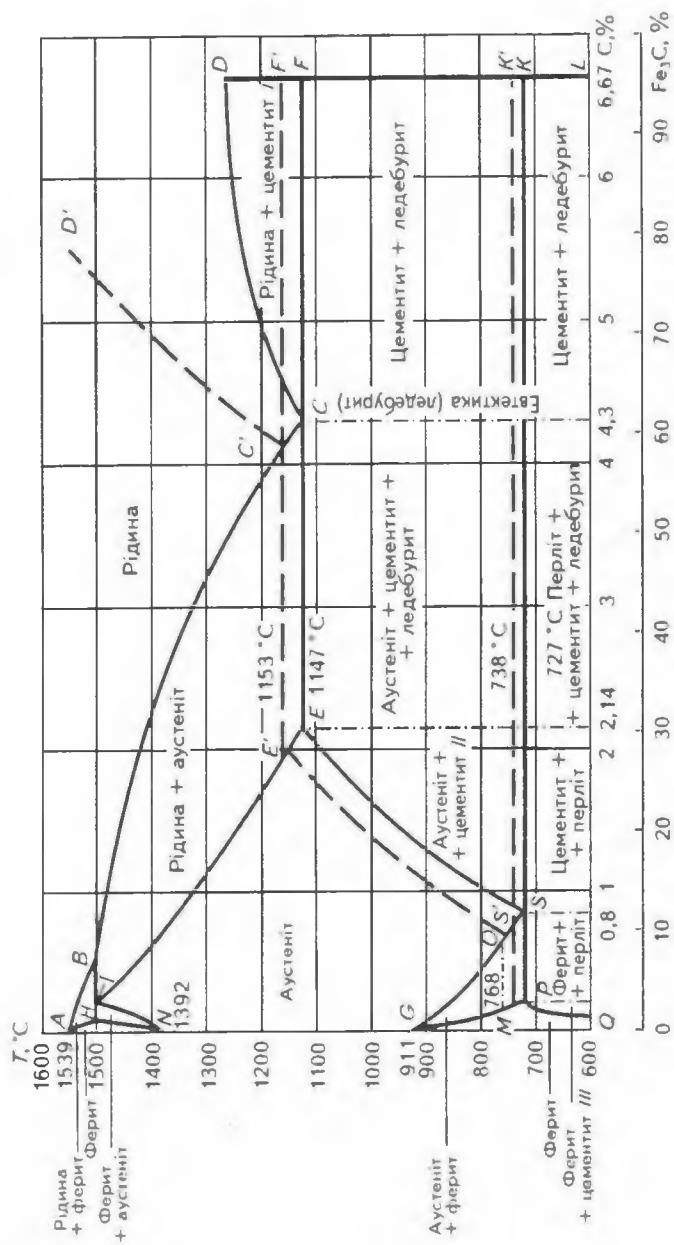


Рис. 4.1

Діаграма фазової рівноваги залізовуглецевих сплавів: суцільні лінії — цементитна (метастабільна) система; штрихові лінії — графітна (стабільна) система

На діаграмі перша зображена суцільними лініями, друга — штриховими. Оскільки цементит за певних умов розпадається з утворенням вільного вуглецю (графіту), то діаграму в системі $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ називають *нестабільною* (метастабільною), а у системі $\text{Fe} - \text{C}$ — *стабільною*. Всі лінії стабільної системи $\text{Fe} - \text{C}$ розташовані на діаграмі вище ліній метастабільної $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$, евтектичне та евтектоїдне перетворення відбувається за більш високих температур (відповідно 1153 і 738 °C). Точки C , E , S зміщуються ліворуч ($C' = 4,26\%$; $E' = 2,11\%$; $S' = 0,70\%$). Лінія E' , C' , F' відповідає температурі утворення графітної евтектики (аустеніт + графіт), лінія P' , S' , K' — утворенню евтектоїда (ферит + графіт), по лінії E' , S' виділяється вторинний графіт.

Основними фазами залізовуглецевих сплавів є рідкі та тверді розчини вуглецю у залізі, цементит та графіт (рис. 4.2). У розплаві заліза при температурі 1147 °C розчиняється до 4,3 % вуглецю. У твердих розчинах заліза (ферит, аустеніт) розчинність вуглецю значно менша.

Твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної ґратки (ОЦК) заліза називають *феритом* (Φ). Високотемпературний δ -ферит містить максимальну кількість вуглецю — 0,1 %. У низькотемпературному α -фериті максимальна розчинність вуглецю становить 0,025 % при 727 °C, а при зниженні температури зменшується практично до нуля. Ферит м'який (80...100 НВ), пластичний, нижче 768 °C магнітний.

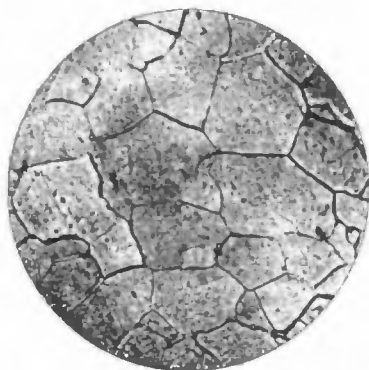
Твердий розчин втілення вуглецю на основі гранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК) γ -заліза називають *аустенітом* (A). Розчинність вуглецю в γ -залізі при зростанні температури підвищується і досягає максимуму (2,14 % C) при 1147 °C. Аустеніт пластичний, немагнітний, твердість його 170 НВ.

Хімічна сполука, яка утворюється в залізовуглецевих сплавах, карбід заліза Fe_3C , має назву *цементит* (Π). Це найбільш тверда (780 НВ) і крихка фаза в системі залізо — вуглець, нижче 217 °C магнітна. Цементит містить 6,68 % C, має складну орторомбічну кристалічну ґратку з дванадцятьма атомами заліза і чотирма вуглецю, температура плавлення становить близько 1600 °C.

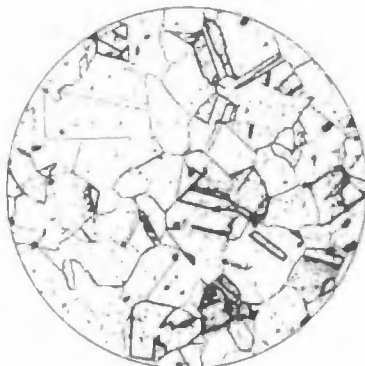
Рис. 4.2

Мікроструктури залізовуглецевих сплавів:

a — ферит, $\times 200$; b — поліедри аустеніту, $\times 100$; b — перліт пластинчастий, $\times 200$; g — перліт зернистий, $\times 200$; d , e — ледебурит, $\times 350$



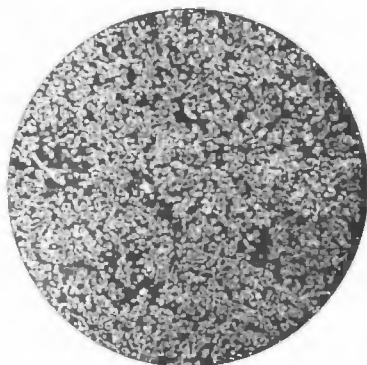
а



б



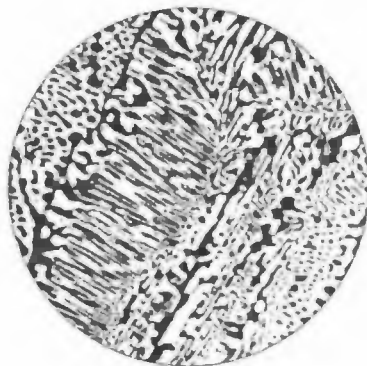
в



г



д



е

У сплавах з вмістом вуглецю більше 4,3 % може випадати одразу при охолодженні розплаву *первинний цементит*. *Вторинний* виділяється з аустеніту вздовж лінії *ES* діаграми, *третинний* — з фериту вздовж лінії *PQ*.

Евтектоїдна (механічна) суміш фериту та цементиту, яка утворюється при 727 °С і вмісті вуглецю 0,8 %, має назву *перліт* (П). Залежно від будови перліту змінюються і його властивості. Так, пластинчастий перліт більш твердий, крихкий та міцніший за зернистий (160...230 НВ; $\sigma_B = 600\ldots 800$ МПа; $\delta = 15\ldots 20$ %).

Евтектичну суміш аустеніту і цементиту (вище 727 °С) або перліту і цементиту (нижче 727 °С) називають *ледебурит* (Л). Він утворюється при вмісті вуглецю 4,3 % за температури 1147 °С, твердий (800 НВ) і крихкий. Це — структурна складова білих чавунів.

У промислових чавунах основною структурною складовою є графіт. Це одна з поліморфних модифікацій (різновидів) структурно вільного вуглецю з гексагональною кристалічною ґраткою. Твердість і міцність графіту низькі. У сірих чавунах він має вигляд пластин різної форми і розмірів, у ковкому — форму пластівців, у високоміцному — кулясту форму (рис. 4.3).

У вуглецевих сплавах заліза графіт є стабільною фазою, а цементит — лише відносно стабільною.

Лінії діаграми стану системи Fe — Fe₃C (див. рис. 4.1) показують (визначають), за яких температур в залізевуглецевих сплавах відбуваються перетворення. Лінія *ABCD*, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів з різним вмістом вуглецю, називається *лінією ліквідусу*. Лінія *AHIECF*, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається *лінією солідусу*. *GOS* — лінія верхньої границі області рівноваги α - і γ -фаз. При охолодженні по цій лінії починається виділення α -фази (при нагрівання — γ -фази). *SE* — лінія початку перетворення аустеніту з утворенням цементиту при охолодженні (критичні точки A_{cm}), при нагріванні сплаву критичні точки A_{cm} . *PQ* — лінія початку виділення цементиту (третинного) при охолодженні або розчинення третинного цементиту при нагріванні.

Однофазні області δ -фериту, α -фериту та аустеніту обмежені відповідно лініями *AHN*, *GPQ* і *NIESG*. Деякі лінії діаграми відображають такі температурні і концентраційні умови, за яких у рівновазі перебувають три фази. Так, лінія *HIB* при перитектичній температурі 1499 °С характеризується наявністю трьох фаз: δ -фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Сплави по лінії *ECF*, що відповідає евтектичній температурі 1147 °С, складаються з рідини, аустеніту і цементиту. Сплави на лінії *PSK*, яка відповідає евтектоїдній температурі 727 °С,

складаються з аустеніту, фериту і цементиту. При температурах 768°C (лінія *МО* для сталі) і 210°C (для чавуну) спостерігається магнітне перетворення відповідно фериту і цементиту.

Х а р а к т е р н і т о ч к и на діаграмі відповідають певним температурам і концентраціям вуглецю (мас. %).

Точка *A* відповідає температурі плавлення (або тверднення) чистого заліза (1539°C). Точка *B* вказує на вміст вуглецю (0,5 %) у рідкій фазі при перитектичній температурі (1499°C). Точка *H* відповідає граничній кількості вуглецю (0,1 %) у δ -фазі при перитектичній температурі. Точка *I* вказує на вміст вуглецю (0,16 %) в аустеніті, який перебуває в рівновазі з δ -фазою і рідиною при перитектичній температурі. Точка *C* вказує на вміст вуглецю (4,3 %) у рідкій фазі в

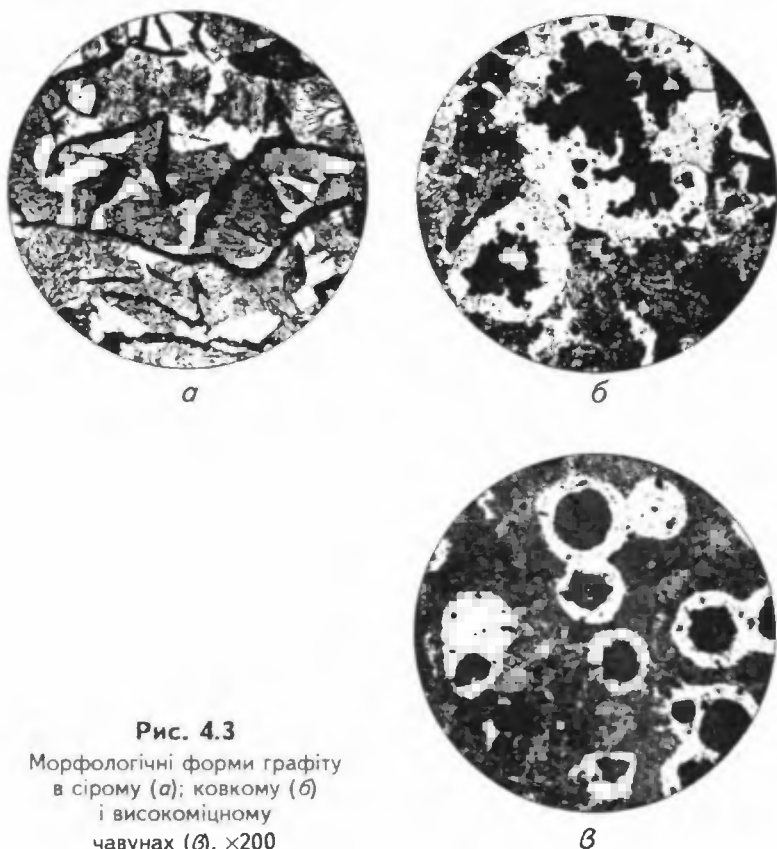


Рис. 4.3
Морфологічні форми графіту
в сірому (а); ковкому (б)
і високоміцному
чавунах (в), $\times 200$

стані рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147°C). Точка *E* відповідає $2,14\%$ C в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі. Точка *S* відповідає $0,8\%$ C в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит + цементит) при евтектоїдній температурі (727°C). Точка *P* відповідає $0,02\%$ C — граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі.

§ 4.2

Фазові та структурні перетворення залізовуглецевих сплавів у зв'язку з діаграмою стану

Розглянемо закономірності фазових перетворень і формування структури чистого заліза, технічного заліза, сталей та чавунів за умов повільного охолодження (нагріву), користуючись діаграмою стану $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$.

Чисте залізо. При охолодженні розплаву чистого заліза перша температурна зупинка на графіку охолодження (рис. 4.4) спостерігається при температурі 1539°C , коли залізо з рідкого стану переходить у твердий. В результаті кристалізації утворюється δ -залізо з кристалічною ґраткою об'ємноцентрованого куба (ОЦК) з параметром $a = 2,93 \text{ \AA}$. При температурі 1400°C ця форма заліза переходить в γ -залізо і змінює кристалічну ґратку на кубічну гранецентровану (ГЦК) з параметром $a = 3,64 \text{ \AA}$. При подальшому зниженні температури до 911°C γ -залізо переходить у β -залізо з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою і параметром $a = 2,90 \text{ \AA}$. Подальше охолодження до 768°C призводить до перетворення немагнітного β -заліза у магнітне α -залізо з ОЦК-ґраткою і параметром $a = 2,86 \text{ \AA}$.

Наявність кількох алотропічних модифікацій заліза залежно від температури позначається на процесах формування структури і властивостей залізовуглецевих сплавів.

Технічне залізо. При охолодженні розплаву технічно чистого заліза (містить $0,02\%$ C) кристалізація сплаву (рис. 4.5, сплав *Л*) починається при деякому переохолодженні відносно лінії *AB* з утворенням кристалів δ -фериту. Вони мають форму дендритів. Вміст вуглецю в

δ -фериті зростає відповідно лінії $АН$, а в рідкій фазі — відповідно лінії AB . При деякому переохолодженні відносно лінії $АН$ кристалізація закінчується (рис. 4.5, точка $З$). Структура складається з рівновісних зерен δ -фериту.

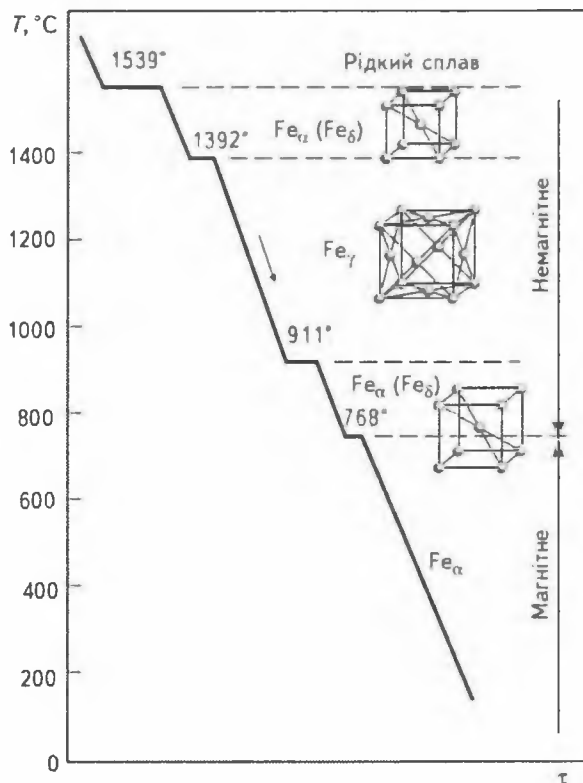


Рис. 4.4
Крива охолодження
чистого заліза

Подальше охолодження сплаву 1 призводить до поліморфного перетворення $\delta \rightarrow \gamma$, яке починається і закінчується при деякому переохолодженні відносно точок 4 і 5 , розташованих на лініях HN і IN . Перетворення супроводжується перерозподілом вуглецю між феритом і аустенітом. При повільному охолодженні склад фаз змінюється відповідно нахилу вказаних ліній. По закінченні перетворення нижче точки 5 структура сплаву складається з рівновісних зерен аустеніту.

При температурах нижче точки 6 структура аустеніту знову стає нестабільною і починається поліморфне перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$, яке

відбувається в інтервалі температур (точки 6...7) і також супроводжується перерозподілом вуглецю між фазами. Нижче точки 7 структура сплаву складається з зерен фериту. В інтервалі точок 7...8 твердий розчин (ферит) є ненасиченим вуглецем, а нижче точки 8 він стає пересиченим і починає виділятися цементит (Fe_3C — надлишкова фаза). Цементит виділяється переважно по границях зерен, що негативно впливає на властивості технічного заліза. Тому на практиці намагаються гальмувати утворення такого (третинного) цементиту. Кінцева структура сплаву після повного охолодження складається з фериту та третинного цементиту.

Формування структури сталей. Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяють у відповідності з діаграмою стану на *доевтектоїдні* (від 0,025 до 0,8 % С), *евтектоїдні* (0,8 % С) і *заевтектоїдні* (більше 0,8 % і до 2,14 % С). Відповідно кристалізація сталей може проходити в один, два або три етапи.

Кристалізація сталей з вмістом вуглецю, що відповідає сплавам *a*, *II*, *б* (див. рис. 4.5), починається з утворення δ -фериту. Під час охолодження склад цих кристалів змінюється відповідно нахилу лінії *АН*, а склад рідини — відповідно лінії *AB*. При температурі лінії *HIB* рідина (розплав) для всіх випадків приймає концентрацію вуглецю біля точки *B*, а кристали — біля точки *H*.

За умови незначного переохолодження відносно лінії *HIB* починається перитектична кристалізація, внаслідок якої за рахунок взаємодії кристалів δ -фериту та рідини утворюються кристали аустеніту. Перитектична кристалізація відбувається при постійній температурі. Залежно від складу сталі вона може завершитись повним зникненням фаз, які існували раніше (сплав *II*), або зберегти надлишок δ -фериту (сплав *a*) чи рідини (сплав *б*). В останньому випадку відбувається третій етап кристалізації, під час якого в температурному інтервалі між лініями *HIB* та *IE* кристалізується аустеніт.

У сплавах *III* і *IV* кристалізація відбувається у температурному інтервалі між лініями *BC* і *IE*. Кристали аустеніту ростуть у формі дендритів. У зв'язку з підвищеною рухливістю атомів вуглецю дендритна ліквідація майже не спостерігається.

Подальше формування структури залежить від складу сталі. В евтектоїдній сталі (сплав *III*) аустеніт залишається стабільним при охолодженні до точки *S*. При охолодженні відносно цієї точки при постійній температурі відбувається евтектоїдне перетворення. В результаті утворюється структура, що складається з суміші зерен (пластин) α -фериту і цементиту. Таку евтектоїдну суміш називають *перлітом*.

При охолодженні доєвтектоїдної сталі (сплав *II*) нижче лінії *GS* аустеніт втрачає стабільність і починається поліморфне перетворення його у ферит. Кристали фериту утворюються переважно на стиках зерен аустеніту і ростуть здебільшого у вигляді рівновісних зерен. Перетворення супроводжується зміною складу аустеніту відповідно лінії *GS*. При евтектоїдній температурі 727 °С аустеніт завжди набуває евтектоїдної концентрації. При деякому переохолодженні відбувається евтектоїдне перетворення.

Таким чином, структура доєвтектоїдної сталі буде складатись з фериту та перліту. Відносну кількість фериту і перліту у структурі доєвтектоїдної сталі, а також аустеніту та фериту при евтектоїдній температурі можна визначити, користуючись *правилом відрізків*. Також можна вирішити зворотню задачу — орієнтовно визначити вміст вуглецю в сталі залежно від співвідношення в структурі фериту і перліту (за умов повільного охолодження).

У заєвтектоїдній сталі (сплав *IV*) нижче лінії *ES* аустеніт стає пересиченим щодо вуглецю. Надлишковий вуглець виділяється з аустеніту у вигляді вторинного цементиту по границях аустенітних зерен. Під час охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніт збіднюється вуглецем відповідно лінії *ES*. Як і в доєвтектоїдній сталі, аустеніт при евтектоїдній температурі матиме евтектоїдну концентрацію вуглецю і при подальшому охолодженні за постійної температури перетвориться на перліт. Структура заєвтектоїдної сталі складається з перліту і вторинного цементиту.

Перетворення при нагріванні сталей відбувається у зворотному порядку.

Формування структури білих чавунів. У білих чавунах весь надлишковий вуглець перебуває у зв'язаному стані, тобто у вигляді цементиту — Fe_3C . Структура чавуну формується за умов не дуже повільного охолодження розплаву у відповідності з метастабільною діаграмою системи залізо — цементит.

Схеми структурних змін під час кристалізації чавунів з різним вмістом вуглецю (доєвтектичного, евтектичного, заєвтектичного) наведено на рис. 4.6.

Розглянемо формування структури доєвтектичного чавуну. Його кристалізація (рис. 4.6, сплав *I*) відбувається в два етапи. В інтервалі температур точок 1...2 кристалізується аустеніт. При цьому склад рідкої фази змінюється відповідно нахилу лінії *BC* діаграми, тобто розплав збагачується вуглецем. При евтектичній температурі концентрація рідкої фази буде відповідати точці *C*, тобто буде евтектичною. Евтектичний розплав, при деякому переохолодженні відносно евтектичної температури (1147 °С), кристалізується в евтектику, яка

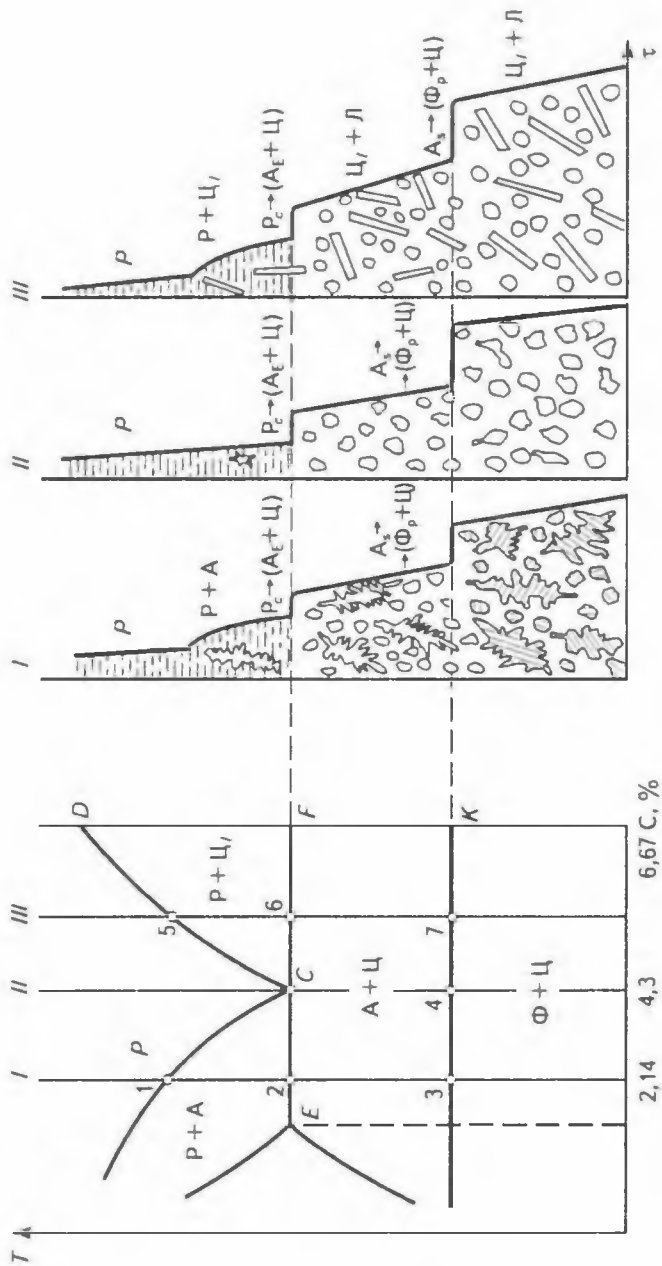


Рис. 4.6

Частина діаграми стану Fe — C та схеми структуроутворення високовуглецевих сплавів (чавунів)

складається з суміші аустеніту і цементиту (ледебурит). Провідною фазою під час евтектичної кристалізації є цементит, пластини якого пересікаються гілками аустеніту. По закінченні кристалізації структура чавуну складається з аустеніту та ледебуриту.

При подальшому охолодженні в інтервалі температур точок 2...3 аустеніт збіднюється вуглецем відповідно до лінії *ES* діаграми. З нього виділяється вторинний цементит, який може нашаровуватись на цементит ледебуриту, утворювати приграничну сітку або відманштетові пластини. Здебільшого вторинний цементит у чавуні не є самостійною структурною складовою. При переохолодженні відносно евтектоїдної лінії діаграм аустеніт складу точки *S* перетворюється на евтектоїд — перліт. Таким чином структура доевтектичного білого чавуну буде складатись з перліту і ледебуриту. Оскільки у ледебуриті аустеніт також перетворився на перліт, такий ледебурит інколи називають *видозміненим*.

Користуючись діаграмою, неважко визначити, що структура евтектичного чавуну (рис. 4.6, сплав *II*) після повного охолодження являє собою ледебурит (видозмінений), а заевтектичного (сплав *III*) складається з первинного цементиту і ледебуриту.

§ 4.3

Вуглецеві сталі

Залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю від 0,025 до 2,14 % називаються *сталями*. Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяють на:

- низьковуглецеві (до 0,25 % C);
- середньовуглецеві (0,25...0,6 % C);
- високовуглецеві (більше 0,6 % C).

За структурою у рівноважному стані їх поділяють на:

- доевтектоїдні;
- евтектоїдні;
- заевтектоїдні.

Доевтектоїдні сталі (від 0,025 до 0,8 %) мають структуру, яка складається з зерен фериту і перліту (ферит + цементит). Зі зростанням вмісту вуглецю зменшується кількість фериту і зростає кількість перліту. *Евтектоїдна сталь* містить 0,8 % C і структура її складається лише з перліту пластинчастої будови. *Заевтектоїдні сталі* (0,8...2,14 % C) мають структуру перліту, по границях зерен якого розташований надлишковий цементит.

Відповідно до зростання вмісту вуглецю у вуглецевих сталях, що перебувають у рівноважному стані, змінюється їхня структура і фазовий склад, зменшується кількість м'якого фериту (80 НВ), зростає кількість перліту і твердого цементиту (800 НВ), зростає твердість і поріг міцності, знижуються ударна в'язкість і пластичні характеристики (рис. 4.7). При вмісті С більше 1,0 % поріг міцності знижується, що зумовлено утворенням суцільної сітки цементиту по границях зерен сталі.

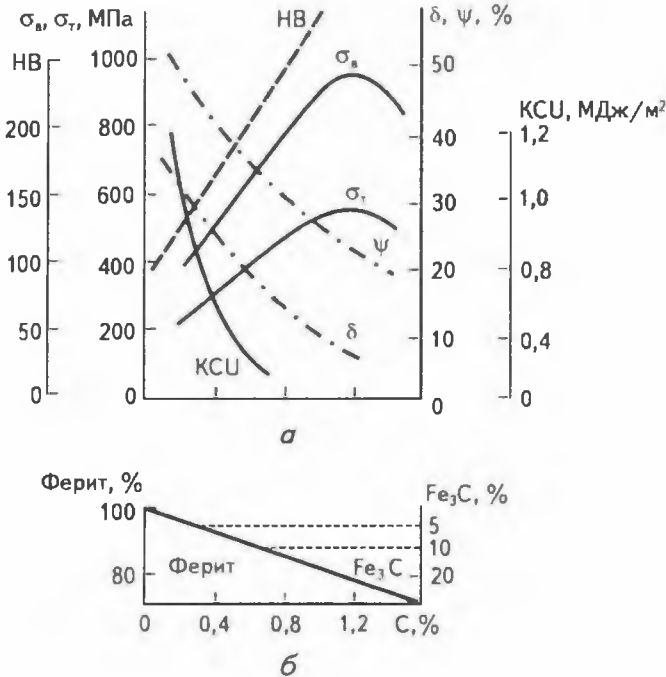


Рис. 4.7

Вплив вуглецю на механічні властивості сталі (а)
та на кількість фериту і цементиту (б)

Вуглецеві сталі промислового виробництва, крім заліза і вуглецю, у своєму складі містять певну кількість домішок інших елементів. Це зумовлено технологією виробництва сталі (наприклад, Mn, Si), неможливістю їх повного видалення (S, P, O, N, H), а також іншими обставинами (Cr, Ni, Cu та інші). Домішки також поділяють на постійні (Si, Mn, S, P), приховані (N, O, H), випадкові (Cu, Al, W, Ni) і спеціальні (вуглець і легуючі елементи).

Промислові сталі, які, крім вуглецю, не містять інших спеціальних домішок, називають *вуглецевими*. Залежно від кількості домішок вуглецеві промислові поділяють на такі основні групи: сталі вуглецеві звичайної якості (до 0,05 % S, до 0,05 % P), якісні вуглецеві сталі (0,03...0,04 % S і P), високоякісні (до 0,025 % S і P), а також вуглецеві сталі спеціального призначення (інструментальні, автоматні, котельні тощо).

Вуглецеві сталі звичайної якості позначають літерами Ст і цифрами від 0 до 6 (умовний номер марки сталі). Більше число відповідає більшому вмісту вуглецю, підвищенню міцності й зниженню пластичності. Індеси праворуч від номера марки вказують на ступінь розкислення сталі: КП — кипляча, ПС — напівспокійна, СП — спокійна сталь (Ст1кп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст4пс, Ст6сп та інші). Між індексом і номером марки іноді може стояти літера Г, яка вказує на підвищений вміст марганцю (до 1 %).

Залежно від призначення і гарантованих властивостей сталі постачають у вигляді прокату трьох груп: А, Б і В.

У сталях групи А не регламентують хімічний склад, але гарантуються механічні властивості. За вимогами до нормуючих показників (хімічний склад і механічні властивості) сталі звичайної якості поділяють на три категорії і позначають відповідною цифрою після індексу розкислення. Так, Ст5Гпс3 означає: сталь групи А, марка Ст5 з підвищеним вмістом Mn, напівспокійна, третьої категорії. Якщо не вказується ступінь розкислення, то категорію позначають за номером марки через тире (Ст4—3). Для сталі першої категорії (Ст4пс) її номер не вказується.

Сталі групи Б постачають з гарантованим хімічним складом, механічні властивості не гарантовані. Застосовують їх для виробів, які піддають термічній обробці і гарячій обробці тиском (штампування, ковка). Позначають на початку марки літерою Б, наприклад БСт0, БСт1кп, БСт6сп.

Сталі групи В постачають за механічними властивостями, що відповідають нормам групи А, і за хімічним складом, що відповідає нормам сталей групи Б. Позначають так: ВСт1кп, ВСт2сп, ВСт4пс, ВСт5сп тощо. Сталі групи В використовують переважно для зварювальних конструкцій.

Сталі вуглецеві якісні відрізняються від сталей звичайної якості меншим вмістом S, P та інших шкідливих домішок, а також більш вузькими інтервалами вмісту вуглецю у кожній марці сталей і підвищеним вмістом Si і Mn (у більшості випадків). Сталі

маркують двозначними числами, які означають вміст вуглецю у сотих частках процента і постачають з гарантованими показниками хімічного складу і механічних властивостей. Сталі марок 08, 10, 15, 20 змінюють властивості залежно від вмісту вуглецю у таких межах: для порогу міцності при розтягуванні $\sigma_B = 330...420$ МПа, відносного видовження $\delta = 25...33$ %, твердості 131...163 НВ. Використовують їх для виготовлення малонавантажених деталей, таких, як шестерні, зірочки, ролики, осі, цементовані вироби. Для середньонавантажених деталей (шестерні, вали, осі) використовують сталі марок 25, 30, 35, 40, 45 з властивостями в межах: для $\sigma_B = 460...610$, $\delta = 19...23$ %, твердість 170...229 НВ. Сталі марок 50 і 55 використовують для деталей, які працюють при високих навантаженнях (шестерні, муфти, пружинні кільця). Механічні властивості їх знаходяться у межах: $\sigma_B = 640...650$ МПа, $\delta = 13...14$ %, 241...255 НВ. Пружини, ресори, ексцентрики та інші деталі для умов тертя виготовляють із вуглецевих сталей марок 60, 65, 70, 75, 80, 85, а також 60Г і 70Г.

Вуглецеві якісні сталі постачають у вигляді прокату, поковок, каліброваного перерізу, круга з обробленою поверхнею (сріблянка) тощо. За ступенем розкислювання розрізняють також кп, пс і спокійну (без вказування індексу сталі).

Сталі вуглецеві спеціального призначення. Серед них сталі, які добре обробляються різанням (*автоматні сталі*) на верстатах-автоматах. При цьому утворюється дрібна і коротка стружка, зменшується шорсткість оброблюваних поверхонь. Автоматні сталі мають підвищений вміст сірки (0,08...0,2 %) і фосфору (0,06...0,15 %). Оброблюваність різанням покращують також технологічні добавки селену, свинцю, телуру. Автоматні сталі маркують літерою А перед цифрами, що вказують середній вміст вуглецю у сотих частках процента: А12, А20, А30, А40, А40Г. Із сталі А12 виготовляють відповідальні вироби, решта автоматних сталей використовуються для деталей, що працюють за умов значних навантажень і тиску.

Сортамент автоматної сталі — сортовий прокат у вигляді прутків круглого, квадратного і шестигранного перерізів. Використовують їх для виготовлення зварювальних з'єднань.

Сталі для котлів, посудин високого тиску, парових котлів, камер горіння, судових топок, газових турбін тощо повинні працювати при значному тиску і температурі до 450 °С та добре зварюватись. Для забезпечення таких властивостей до їхнього складу додають титан і додатково розкислюють алюмінієм. Вуглецеві котельні

сталі 12K, 15K, 16K, 18K, 20K і 22K з вмістом від 0,08 до 0,28 % вуглецю після нормалізації і відпуску виробляють у вигляді листа завтовшки до 200 мм (див. розділ 4).

Інструментальні вуглецеві сталі (0,65...1,3 % C). Виготовляють такі марки цих сталей: У7, У8, У8Г, У10, У11, У12 і У13. Цифри вказують на вміст вуглецю у десятих частках процента. Літера А після цифри означає високоякісну сталь. Наприклад, сталь марки У12А розшифровують так: інструментальна вуглецева сталь з вмістом вуглецю 1,2 %, високоякісна.

Інструменти, що працюють за умов ударного навантаження, виготовляють із сталей У7А, У8А (молотки, зубила, бородки, стамески). Інструменти ж, що потребують високої твердості без ударного навантаження (свердла, мітчики, напилки, розвертки, шабери), виготовляють із сталей У12А, У13А. Для вимірювального інструменту використовують сталі У8, У9, У10, У12. Вада інструментів з вуглецевих сталей — це низька теплостійкість (здатність зберігати твердість при підвищенні температури). Інструменти з вуглецевих сталей при нагріванні вище 200 °С втрачають необхідну для роботи твердість.

§ 4.4

Промислові чавуни

За хімічним складом чавуни відрізняються від сталі високим вмістом вуглецю (більше 2,14 %) і постійних домішок (S, P, Si, Mn). Порівняно зі сталями чавуни мають нижчі механічні властивості, але значно кращі технологічні (ливарні, оброблюваність різанням, антифрикційні властивості, зносостійкість). Це зумовлює широке використання чавуну для виготовлення багатьох деталей у різних галузях машинобудування.

Залежно від хімічного складу та умов кристалізації вуглець у чавуні може бути у хімічно зв'язаному стані у вигляді цементиту Fe_3C , або у вільному стані у вигляді графіту. Відповідно до цього розрізняють *білі чавуни* (вуглець у вигляді цементиту) і як складову — перліт; *сірі чавуни* (вуглець у вигляді графіту пластинчастої або пелюсткової форми), а також *високоміцні* (графіт кулястої форми) та *ковкі* (графіт пластинчастої форми).

Структурний стан білих чавунів залежить від вмісту вуглецю і відповідає діаграмі рівноважного стану Fe — Fe_3C (див. рис. 4.1). За

структурою їх поділяють на доєвтектичні (2,14...4,3 % С), евтектичні (4,3 % С) і заєвтектичні (4,3...6,7 % С).

Структуру доєвтектичних білих чавунів складають перліт, ледебурит і вторинний цементит. Металографічно перліт спостерігається у вигляді темних зерен, цементит — світлих смуг, а ледебурит — у вигляді ділянок з темними вкрапленнями (суміш дрібних округлих темних зерен перліту, рівномірно розподілених у білій основі цементиту) (рис. 4.8, а).

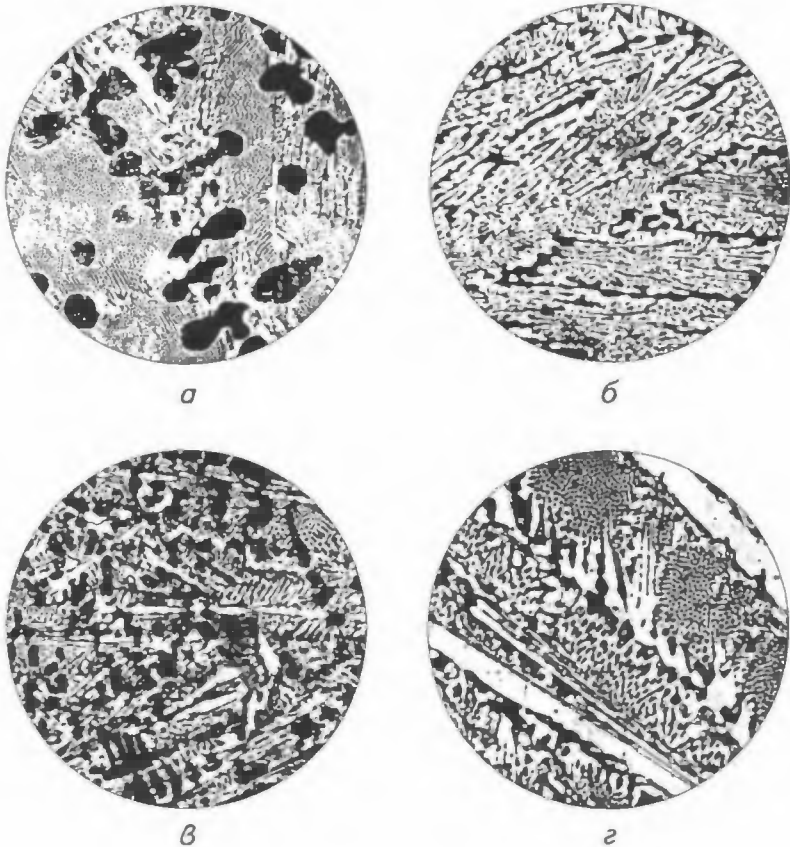


Рис. 4.8

Структури доєвтектичного (а), евтектичного (б) та заєвтектичного (в, г) чавунів, $\times 100$

Евтектичний чавун має структуру ледеburиту — рівномірної механічної суміші перліту і цементиту (рис. 4.8, б).

За евтектичний чавун характеризує структура, що складається з первинного цементиту і ледеburиту (рис. 4.8, в, г).

Одержанню таких структур сприяє підвищений вміст у чавуні марганцю, зменшений вміст кремнію і зростання швидкості охолодження під час тверднення. Наявність у структурі білого чавуну твердих цементиту і ледеburиту зумовлює їхню високу твердість і крихкість та дуже ускладнює обробку різанням. Тому використання білих чавунів у машинобудуванні обмежене. Використовують їх для виготовлення шроту і зірочок для очистки литва, куль дробильних агрегатів. В основному ж білі чавуни переробляють на сталь або шляхом спеціальної термічної обробки (графітизуюче відпалювання) — на ковкий чавун.

Структура сірих, ковких і високоміцних чавунів складається з металевої основи, що пронизана графітовими вкрапленнями. Металева основа таких чавунів може бути перлітною, феритною і ферито-перлітною. Вона зумовлює характеристики твердості, міцності, зносостійкості. Такі ж характеристики, як пластичність, опір руйнуванню при розтягуванні, опір спрацюванню, залежать головним чином від форми, розмірів і характеру розподілу графітових вкраплень.

Розрізняють три основні форми графітових вкраплень (фаз): пластинчасту, пластівчасту та кулясту.

Сірі чавуни. Їм притаманна пластинчаста форма графіту, який можна розглядати як тріщину чи надріз, що створює концентрацію напружень у металевій матриці та різко знижує характеристики міцності чавуну. Сірий чавун — найдешевший конструкційний матеріал. У виробництво надходить у вигляді виливків, має високі ливарні властивості, добре оброблюється різанням, чинить опір зношуванню, здатен розсіювати коливання при вібраційних і змінних навантаженнях (у 2... 4 рази вище за сталь).

Сірі чавуни одержують при введенні до розплаву чавуну речовин (графітизаторів), що сприяють розпаду цементиту і виділенню вуглецю у вигляді графіту. Графітизатором сірого чавуну є кремній. При введенні приблизно 5 % кремнію цементит сірого чавуну майже повністю розпадається, утворюючи структуру з пластичної феритної основи і вкраплень пластинчастого графіту (рис. 4.9, а). При зменшенні кількості кремнію цементит перліту розпадається частково, утворюючи ферито-перлітну (рис. 4.9, б) структуру основи чавуну. Подальше зменшення вмісту кремнію призводить до формування структури сірого чавуну на перлітній основі (рис. 4.9, в). Найміцні-

шими є сірі чавуни на перлітній основі, а найбільш пластичними — на феритній.

Промисловість випускає такі марки сірих чавунів: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45. При маркуванні сірих чавунів літери СЧ означають — чавун сірий, а цифри — мінімальне значення порогу міцності при розтягуванні (σ_B , кгс/мм²).

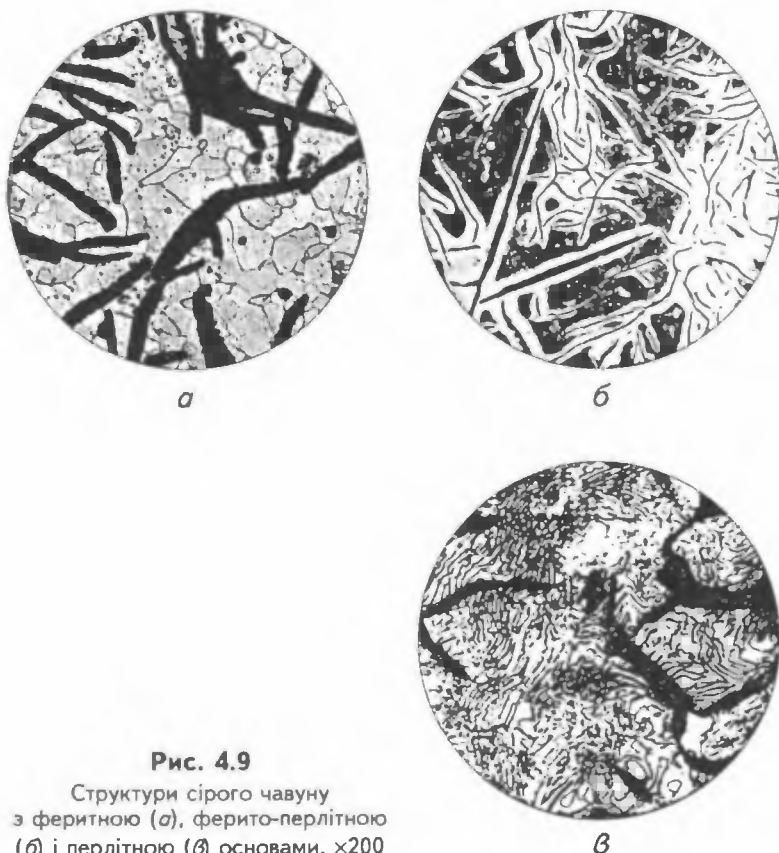


Рис. 4.9

Структури сірого чавуну
з феритною (а), ферито-перлітною
(б) і перлітною (в) основами, $\times 200$

Залежно від рівня фізико-механічних характеристик сірі чавуни умовно можна поділити на чавуни малої та підвищеної міцності і чавуни зі спеціальними властивостями.

Сірі чавуни малої міцності мають феритну або ферито-перлітну структуру з пластинчастим графітом і відповідають

маркам від СЧ10 до СЧ30. Наприклад, при розтягуванні міцність чавуну СЧ25 $\sigma_B = 250$ МПа, твердість 180...250 НВ.

Сірий чавун підвищеної міцності відповідає маркам від СЧ35 до СЧ45, має перлітну металеву основу і більш тонку розгалужену пелюсткову форму графіту. Міцність таких чавунів $\sigma_B = 350...450$ МПа, твердість 200...289 НВ.

Міцність цих чавунів забезпечують легуванням і модифікуванням. Легування здійснюють присадкою невеликої кількості нікелю і хрому, молібдену з титаном або міддю. При цьому одержують дрібнозернисту структуру і більш тонку форму графіту. Модифікування здійснюють добавками (0,1...0,3 % від маси чавуну) феросиліцію, сілікоалюмінію, сілікокальцію та іншими. Їх додають безпосередньо у ківш під час його заповнення розплавом. Структура такого чавуну не містить ледебуритного цементиту, чавун твердне з відбілюванням (білий або половинчастий), хімічний склад чавуну лишається практично незмінним. Модифікований рідкий чавун необхідно одразу розливати у ливарні форми, оскільки ефект модифікування зникає вже через 10...15 хв.

У машинобудуванні з сірих чавунів СЧ10, СЧ15 виготовляють деталі для низьких і середніх статичних навантажень (станини верстатів, кришки люків, подушки опор тощо); з чавунів СЧ20, СЧ25 — для підвищених навантажень динамічної дії (картери двигунів, блоки циліндрів, поршні, станини); СЧ30, СЧ35, СЧ40 — для високих навантажень і зношування (розподільні вали, зубчасті колеса, гільзи блоків циліндрів, гальмівні колодки).

Ковкі чавуни. Це умовна назва більш пластичного, порівняно з сірим, чавуну. Його ніколи не куять. Одержують його шляхом тривалого високотемпературного відпалювання виливків білого чавуну з перлітно-цементитною структурою. Під час такого графітізуючого відпалювання (див. гл. 5) цементит білого чавуну розпадається, утворюючи графіт пластівчастої форми (рис. 4.10, а, б). Залежно від структури металевої основи розрізняють ковкі феритний і перлітний чавуни.

Феритні ковкі чавуни одержують з білих, які мають у своєму складі 2,4...2,8 % С; 0,8...1,4 % Si; 0,3...0,4 % Mn; 0,08...0,1 % S; $\leq 0,2$ % Р.

Перлітні ковкі чавуни виготовляють з білих, які містять 2,8...3,4 % С; 0,5...0,8 % Si; 0,4...0,5 % Mn; 0,12 % S; $\leq 0,2$ % Р.

Залежно від показників міцності при розтягуванні (σ_B) і відносного видовження (δ) ковкі чавуни розрізняють за марками: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12 — це феритні чавуни; КЧ45-6, КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2 — перлітні.

З ковких чавунів виготовляють високоміцні деталі для змінних і ударних навантажень, підвищеного спрацювання, наприклад, шестерні, шатуни, картер заднього мосту, гальмівні колодки, ступиці, гачкові ланцюги, пальці різальних апаратів тощо. Антикорозійні властивості ковких чавунів досить високі при експлуатації в середовищі вологого повітря, води, топочних газів. Вони широко застосовуються у сільськогосподарському, автомобільному, текстильному машинобудуванні.

Високоміцні чавуни — це різновид сірого чавуну з феритною або перлітною структурою, модифікованого магнієм або комплексними

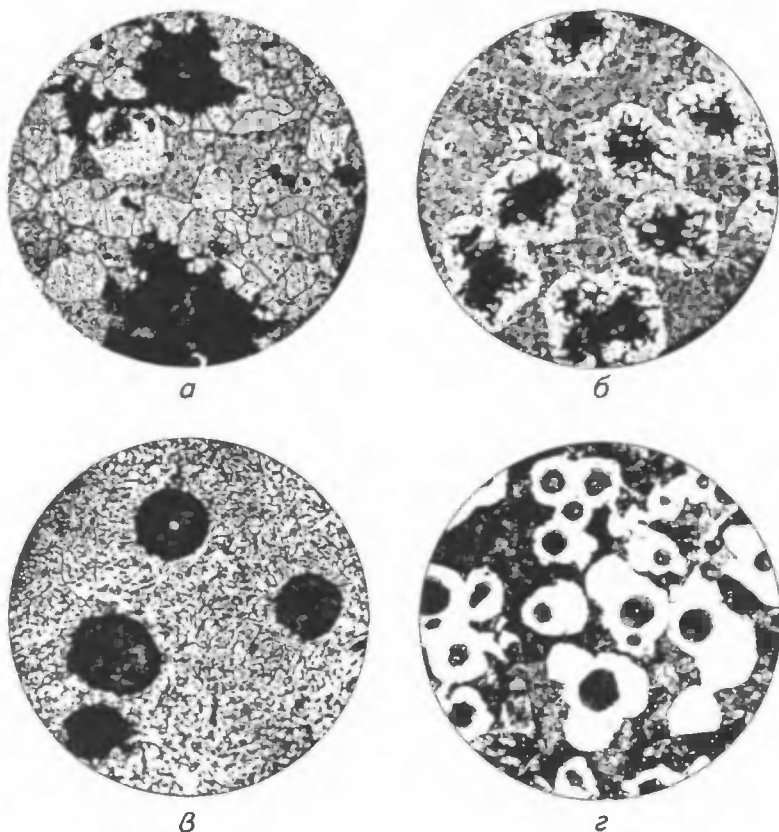


Рис. 4.10

Структури ковкого (а, б) і високоміцного (в, г) чавунів, $\times 200$

модифікаторами (магній з добавками силіцію та інші). В результаті модифікування одержують графіт кулястої форми і невеликих розмірів (рис. 4.10, а, з). Такі чавуни мають підвищену міцність і порівняно з сірими чавунами здатні чинити опір крихкому руйнуванню. Вони мають феритну або перлітну структуру металевої основи.

Залежно від порогу міцності (σ_B) і відносного видовження (δ) високоміцні чавуни поділяють на такі марки: ВЧ38-17, ВЧ42-12, ВЧ45-5, ВЧ50-2, ВЧ60-2, ВЧ70-3, ВЧ80-3, ВЧ100-4, ВЧ120-4.

Діапазони зміни властивостей цих марок такі: $\sigma_B = 380...1200$ МПа, $\delta = 2...7$ %, твердість 140...369 НВ.

Високі механічні властивості цих чавунів дозволяють використовувати їх для виготовлення деталей машин, що працюють за умов значних навантажень, замість поковок і виливків із сталей. З високоміцного чавуну виготовляють деталі ковальсько-пресового обладнання, прокатних станів, парових турбін, тракторів, автомобілів (колінчасті вали, поршні тощо).

Чавуни зі спеціальними властивостями. Використовують їх у випадку, коли вилівок, окрім міцності, має забезпечити певний рівень специфічних властивостей, наприклад хімічну або корозійну стійкість, зносостійкість, жаростійкість тощо. Так, аустенітний чавун має високі показники хімічної стійкості у кислотах і лугах, а також жароміцності. Приклади таких чавунів — нірезит (містить додатково 14 % Ni, 2 % Cr, 7 % Cu), нікросилал (містить 5 % Si, 18 % Ni, 2 % Cr та інші). Жаростійкий чавун-чугаль містить 20...25 % алюмінію.

Магнітний чавун (феритний з кулястим графітом) використовують для виготовлення корпусів електричних машин, щитів, рам тощо.

Немагнітні чавуни — нікель-марганцевий (містить 7...10 % Mn, 7...9 % Ni) або марганцево-мідний (містить 9,8 % Mn і 1,2...2,0 % Cu) — використовують для виготовлення кожухів і бандажів електричних машин.

До чавунів із спеціальними властивостями відносять також феросплави, такі, як феромарганець, феросиліцій, ферохром, що застосовують для розкислення і легування сталі у металургійних і ливарних процесах.

§ 4.5

Леговані сталі

Легованими називають сталі, які, крім заліза, вуглецю і технологічних домішок, містять спеціальні домішки (легуючі елементи). Легуючі елементи вводять до складу сталі для надання їй або покращання певних фізичних, хімічних, механічних або технологічних властивостей. Сталі можуть містити один або кілька легуючих

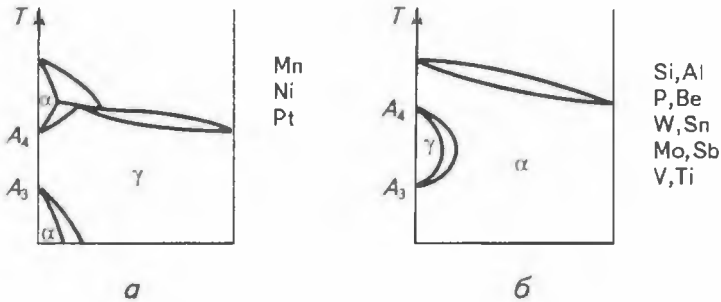


Рис. 4.11

Вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза.
Схеми діаграм стану залізо — легуючий елемент

елементів. Наявність цих елементів приводить не тільки до зміни властивостей сталі, а й до режимів її термічної обробки. Легуючі елементи в тій чи іншій мірі розчиняються в основних фазах сталі (фериті, аустеніті, цементиті) або утворюють спеціальні карбіди. Розчинюючись у залізі, елементи впливають на температурний інтервал існування його алотропічних модифікацій, змінюючи критичні точки A_3 і A_4 (відповідно 911 і 1392 °C) на шкалі температур діаграми стану. Такі елементи, як Mn, Ni, Pt, C, підвищують точку A_4 і знижують A_3 , тобто розширюють область існування γ -модифікацій заліза (рис. 4.11, а); Si, Al, W, Sn, Mo, V, Ti, Sb — знижують точку A_4 і підвищують A_3 , тобто звужують область існування γ -модифікацій заліза і розширюють область існування модифікацій α -заліза (рис. 4.11, б).

Це може призвести до того, що при певному вмісті елементів, наприклад, Mn і Ni, γ -стан буде існувати як стабільний від кімнатної температури до температури плавлення (аустенітні сплави). При пев-

ному вмісті таких елементів, як V, Mo, Si та інші, стабільним для всіх температур буде α -стан (феритні сплави).

Багато елементів (W, Cr, Si, Mo, V, Ti) зміщують положення критичних точок на діаграмі залізовуглецевих сплавів (лінія SE) ліворуч. Внаслідок цього сталь, легована цими елементами, буде утворювати перлітну структуру при вмісті вуглецю $< 0,8 \%$.

Важливим є вплив легуючих елементів на властивості фериту. Розчинюючись у кристалічній ґратці α -заліза атоми легуючих елементів змінюють її параметри, підвищують характеристики міцності фериту і знижують пластичність. Найбільше підвищують міцність Si, Mn і Ni, дещо менше Mo, W, Cr. Більшість елементів, зміцнюючи ферит, незначно впливають на пластичність, проте знижують ударну в'язкість сталі (за винятком Ni). При вмісті до 1 % Mn і Cr підвищують ударну в'язкість. За умов дальшого підвищення їхнього вмісту ударна в'язкість знижується, досягаючи рівня значень нелегованого фериту при 3,0 % Cr і 1,5 % Mn.

У періодичній системі елементів ліворуч від заліза розміщені так звані перехідні метали (мають недобудовану d -оболонку порівняно з Fe) — карбідоутворюючі елементи (Ti, W, Cr, Mn, V, Nb, Mo), а праворуч — ті, що не утворюють карбідів (Co, Ni, Cu). Чим менше заповнена d -оболонка елемента, тим активніше він утворює карбіди. Карбідні фази мають високу твердість і температуру плавлення. Кількість, подрібненість, характер розміщення, морфологія і природа карбідної фази суттєво впливають на властивості легованої сталі.

Карбідоутворюючі елементи впливають не лише на ізотермічне перетворення аустеніту, а й на самий процес ізотермічного перетворення. При цьому утворюються карбіди, розчинні в аустеніті, які по-різному впливають на швидкість розпаду аустеніту за різних температур.

Практично важливим є здатність легуючих елементів сповільнювати швидкість розпаду аустеніту під час перлітного перетворення. Це сприяє глибокій прогартованості і переохолодженню аустеніту до інтервалу мартенситного перетворення (зменшення $V_{кр}$).

Прогартованість значно підвищується при одночасному легуванні кількох елементів (Cr + Mo, Cr + Ni, Cr + Ni + Mo) порівняно з роздільним легуванням Mo, W, V, які також підвищують прогартованість сталі.

Важливим є також вплив легуючих елементів на ріст зерна сталі. Сприяють цьому росту Mn і V. Слабо впливають на розміри зерна Ni, Co, Si, Cu (не утворюють карбідів). Карбідоутворюючі елементи (Cr, Mo, W, V, Ti) подрібнюють зерно і гальмують його ріст при підвищених температурах.

Класифікація і маркування легованих сталей. Державна система маркування якісної легованої сталі складається зі сполучення літер і цифр, що орієнтовно вказують на її хімічний склад. Легуючі елементи мають такі позначення: азот (А), ніобій (Б), вольфрам (В), марганець (Г), мідь (Д), кобальт (К), берилій (Л), молібден (М), нікель (Н), свинець (П), хром (Х), бор (Р), кремній (С), титан (Т), ванадій (Ф), цирконій (Ц), алюміній (Ю), рідкісноземельні метали (Ч).

Цифри після літери вказують приблизно на вміст даного легуючого елемента. При вмісті елемента менше 1 % цифри не пишуть; при вмісті близько 1 % — пишуть цифру 1; близько 2 % — цифру 2 тощо. При маркуванні конструкційних якісних сталей цифри перед першою літерою марки використовують для позначення середнього вмісту вуглецю у сотих частках процента, а у високовуглецевих інструментальних сталях — в десятих частках процента. Наприклад, сталь марки 20Х містить у своєму складі 0,17...0,23 % С, 0,7...1,0 Cr; сталь 30ХГСН2 — 0,3 % С, до 1 % Cr, до 1 % Mn, до 1 % Si, до 2 % Ni.

Літера А у кінці марки сталі вказує на обмежений вміст сірки і фосфору (до 0,03 % кожного), а також на те, що дотримано всіх технологічних вимог металургійного процесу виробництва в и с о к о я к і с н о ї с т а л і, наприклад, сталь 18ХН3А. Особливо високоякісна сталь має в кінці марки позначення літерою Ш. Наприклад, сталь 95Х18Ш, особливо високоякісна, виплавлена методом електрошлакового переплаву, містить 0,9...1,0 % С, 17...19 % Cr, 0,03 % Р і 0,015 % S.

Деякі групи сталей мають додаткові позначення: марки шарикопідшипникових сталей починаються з літери Ш, швидкорізальних — з літери Р, магнітотвердих — з літери Е, автоматних — з літери А.

Для скорочення кількості знаків при маркуванні сталі іноді відступають від загальноприйнятої системи, особливо для складнолегованих сталей, і не вказують цифри, що означають вміст вуглецю або іншого елемента (інструментальні сталі з вмістом вуглецю понад 1 %).

Класифікують леговані сталі за такими ознаками.

За хімічним складом, тобто залежно від вмісту вуглецю (низьковуглецеві до 0,25 %, середньовуглецеві — 0,25...0,6 %, високовуглецеві — 0,6...2 %) та вмісту основного легуючого елемента (хромисті, нікелеві, хромонікелеві, марганцеві тощо).

Сталі з високим вмістом легуючих елементів, що розширюють γ -область на діаграмі стану, утворюють клас аустенітних сталей; сталі з високим вмістом елементів, що звужують γ -область, і низьким вмістом вуглецю — утворюють клас феритних сталей.

Залежно від структури у рівноважному стані розрізняють: до-евтектоїдні (від 0,02 до 0,8 % C), які містять у структурі перліт і надлишковий ферит; евтектоїдні (0,8 % C) з перлітною структурою; заевтектоїдні (понад 0,8 % C), які мають у структурі надлишкові (вторинні) карбіди; ледебуритні, що мають надлишкові карбіди, які виділяються з рідкої фази під час кристалізації. Останні у литому стані утворюють з аустенітом евтектику — ледебурит.

За структурою після охолодження зразків (діаметром 25 мм) на повітрі розрізняють три класи сталей: перлітний — сталі цього класу характеризує відносно низький вміст легуючих елементів; мартенситний — сталі містять дещо більшу кількість легуючих елементів; аустенітний — характеризується високим вмістом легуючих елементів.

За якістю сталі поділяють на сталі звичайної якості, якісні, високоякісні та особливо високої якості.

За призначенням сталі можуть об'єднуватись у кілька груп:

Конструкційні — використовують для деталей машин і механізмів і зазвичай піддають термічній обробці. Своєю чергою, їх поділяють на сталі для цементації; сталі поліпшувані (гартування + + високий відпуск); сталі будівельні (низьколеговані) — призначені для термічної обробки у споживача.

Інструментальні сталі використовують для виготовлення різального, штампувального і вимірюваного інструменту. Умовно їх поділяють на вуглецеві, леговані, штамповані, швидкорізальні.

Сталі з особливими властивостями мають певні, різко визначені властивості: жароміцні, теплостійкі, зносостійкі, неіржавіючі, з особливими магнітними або електричними властивостями тощо.

Конструкційні леговані сталі. Поділяють їх на: • сталі для цементації; • поліпшувані; • високоміцні. Вони мають забезпечувати комплекс високих механічних властивостей, конструктивну міцність і довговічність виробів при експлуатації.

Сталі для цементації використовують для виробів, які працюють за умов тертя, ударних і перемінних навантажень. Надійність і ресурс роботи таких виробів забезпечується високим рівнем твердості й міцності поверхні та достатньою конструктивною міцністю і в'язкістю серцевини металу. Для цього сталі, призначені для цементації, насичують з поверхні вуглецем (цементують) і далі піддають

гартуванню з низьким відпуском, що забезпечує високу твердість (58...63 HRC) поверхні деталі і потрібну в'язкість серцевини. Хімічний склад таких сталей обмежений вмістом вуглецю до 0,25 %, сумарним вмістом легуючих елементів для низьколегованих сталей до 2,5 % і для середньолегованих — 2,5...10 %.

Для виробів малих розмірів, що працюють за умов тертя і середніх навантажень, використовують сталі типу 15ХА, 20Х ($\sigma_B = 700...750$ МПа, $\delta = 10...12$ %, КСЧ = 0,6...0,7 МДж/м²). Відповідальні деталі для експлуатації при високих і ударних навантаженнях і великих швидкостях виготовляються зі сталей типу 15ХФ, 18ХГ, 25ХГМ ($\sigma_B = 900...1200$ МПа, $\delta = 10$ %, КСЧ = 0,8 МДж/м²). Великі важконавантажені деталі для експлуатації за умов динамічних і вібраційних навантажень виготовляють зі сталей, легованих комплексом карбідотворюючих елементів (Cr, V, Ti, Mo) з нікелем ($\sigma_B = 800...1300$ МПа, $\delta = 8...12$ %, КСЧ = 1,0 МДж/м²). Серед них сталі 20ХН, 20ХНЗА, 12Х2Н4, 18ХГТ, 20ХГР. Типові режими термічної обробки після цементації — гартування з низьким відпуском для одержання структури мартенситу.

Поліпшувані сталі — це низьколеговані сталі з вмістом вуглецю 0,3...0,5 %. Для забезпечення потрібних властивостей міцності, пластичності та в'язкості їх піддають гартуванню з високим відпуском (500...600 °С), тобто поліпшують. Загальна кількість легуючих елементів у поліпшуваних сталях становить 3...5 % (Cr, Ni, W, Mo, Si, V), основний легуючий елемент — хром (0,8...1,1 %). Властивості таких сталей: $\sigma_B = 900...1600$ МПа, $\delta = 10...12$ %, КСЧ = 0,4...0,9 МДж/м². Розрізняють хромисті сталі — 40Х, 45Х, для прогартованості їх додатково легують бором 0,002...0,003 % (40ХР) або до 1 % марганцем (40ХГ). З них виготовляють деталі для роботи за умов підвищених напружень і знакозмінних навантажень — шатуни, колінчасті вали. Хромомарганцеві сталі, леговані Si і Mn (хромансил), наприклад 30ХГС, добре зварюються, після термообробки $\sigma_B = 1650$ МПа, $\delta = 6$ %, КСЧ = 0,5 МДж/м². Для великих відповідальних і важконавантажуваних деталей складної форми використовують сталі зі значною кількістю Ni і Mo, наприклад 40ХНМ, 30ХН2МФ, 40ХН2МФ, 40ХН2МА, 38ХН3МФ тощо.

Високоміцні леговані сталі використовують для виготовлення особливо відповідальних і важконавантажених деталей, які експлуа-

тують за умов різко змінюваних навантажень (деталі шасі, конструкції фюзеляжів тощо). Це комплексно-леговані (кількома легуючими елементами) середньовуглецеві сталі (0,3...0,6 % С), які зміцнюють термічною обробкою або піддають термомеханічній обробці. Наприклад, 30ХГСН2А, 40ХГСН3ВА ($\sigma_B = 1850...2000$ МПа, $\delta = 11...12$ %, $KCU = 0,4...0,6$ МДж/м²).

Пружинно-ресорні леговані сталі містять у своєму складі 0,5...0,7 % С, додатково леговані Si (до 2 %) і елементами Mn, Cr, V, W, B, які підвищують пружні характеристики і прогартованість сталі. Сталі 50С2, 50ХГФА використовують для ресор автомобілів, сталі 55СГ, 60СГ, 65С2ВА, 60С2ХФА — для відповідальних пружин, ресор тощо. Найвищу пружність забезпечує гартування і середній (400...500 °С) відпуск на структуру трооститу відпуску (високодисперсна суміш фериту з карбідами). Додаткове легування сталі вольфрамом, молібденом, ванадієм підвищує стійкість сталі під час відпуску, що дозволяє використовувати їх для роботи за умов нагріву до 200...250 °С. При легуванні бором (0,003 %) підвищується поріг пружності сталі і прогартованість (сталі 55ХГР, 50ХФРА та інші). Для підвищення опору втомі і зменшення чутливості до концентраторів напружень пружини і листи ресор у готовому вигляді піддають поверхневому наклепуванню струменевою обробкою шротом.

Шарикопідшипникові сталі складають особливу групу конструкційних сталей, що відповідають вимогам високої міцності і зносостійкості. Для них характерним є високий вміст вуглецю (≈ 1 %) і хрому. Для маркування цих сталей використовують літери ШХ, які розшифровуються як сталь шарикопідшипникова хромиста, далі йдуть цифри, які вказують на вміст хрому в десяти частках процента (ШХ6, ШХ9, ШХ15).

Евтектоїдний вміст вуглецю і хрому забезпечують одержання після гартування структури дисперсного мартенситу з карбідами високої твердості, зносостійкості і прогартованості сталі. Для підвищення прогартованості сталі додатково легують марганцем і кремнієм (сталі ШХ15СТ, ШХ20СГ).

Термічна обробка шарикопідшипникових сталей включає операції відпалювання прокату, гартування (від 790...880 °С) і відпуск при 150...200 °С на твердість 62...65 HRC. До сталей цієї групи існують підвищені вимоги щодо чистоти і рівномірності розподілу карбідів.

Зносостійкі сталі об'єднують групи високомарганцевих і графітованих сталей.

Високомарганцеві сталі типу 110Г13Л містять у своєму складі 0,9...1,4 % С і 11,5...15 % Mn, характеризуються високою зносостій-

кістю, пластичністю і ударною в'язкістю. Використовуються для виготовлення широкої номенклатури виливків, які працюють за умов ударно-абразивного спрацювання (бронеплити, біла дробарок, траки, залізничні стрілки і хрестовини, зубці ковша екскаваторів). Сталь 110Г13Л має однофазну аустенітну структуру після гартування без поліморфного перетворення від температур 1000...1100 °С і такі механічні властивості: $\sigma_{\text{в}} = 800 \dots 1000$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 250 \dots 400$ МПа, $\delta = 35 \dots 45$ %, $\psi = 40 \dots 50$ %, 170...230 НВ, КСЧУ = 1,6...2,1 МДж/м². Вона здатна до наклепування і внаслідок цього до підвищення твердості (600 НВ).

Графітизована сталь містить у своєму складі 1,5...2,0 % С і до 2 % Si. Після гартування вона поєднує властивості загартованої сталі та чавуну. Графіт у такій сталі є змашуючою фазою. Сталь має структуру феритоцементитної суміші з певною кількістю графіту. Залежно від режиму термічної обробки і вмісту вуглецю кількість графіту може значно змінюватись. Графітизовані сталі використовують для виготовлення поршневих кілець, поршнів, колінчастих валів та інших виливків для умов тертя.

Інструментальні леговані сталі, порівняно з вуглецевими, характеризуються підвищеною прогартованістю, значна міцність, більш високі різальні властивості, пластичність у відпаленому стані. Легуючі елементи (W, Mo, Co, Cr) підвищують теплостійкість, Mn — загартованість, N — в'язкість, V — зносостійкість.

Сталі з сумарним вмістом легуючих елементів до 2,5 % відносять до низьколегованих, до 10 % — до середньолегованих і більше 10 % — до високолегованих.

У низьколегованих сталях основним легуючим елементом є хром (сталі X, 11X, 13X). При вмісті хрому до 0,4 % прогартованість сталей низька, а з підвищенням вмісту хрому до 1,3...1,6 % при легуванні кількома елементами (Cr, Mn, Si, W) вона значно зростає (сталі 9XC, 9XBГ, XBГ, X12M та інші). Так, сталь X прогартовується у маслі на глибину до 25 мм, сталь 9XC — до 35 мм, сталь XBГ — до 45 мм, сталь XBГC — до 80 мм.

Сталь X з теплостійкістю до 200 °С застосовують для токарних і стругальних різців: сталь 9XC з теплостійкістю до 260 °С — для виготовлення свердел, розверток, фрез, метчиків, плашок; сталі типу XBСГ, 9X5ВФ з теплостійкістю до 450 °С використовують для виготовлення крупних свердел, плашок, протяжок, фрез та іншого різального інструменту.

Високолеговані інструментальні сталі містять у своєму складі W, Cr, V, Mo (до 18 % основного легуючого елемента) і мають високу теплостійкість — до 600...650 °С. Такі сталі називають ш в и д к о-

різальними і позначають літерою Р і цифрою, яка вказує на вміст вольфраму у процентах (сталі Р9, Р18). Вміст хрому (4 %) і ванадію (2 %) при маркуванні цих сталей не вказують. До складу швидкорізальних сталей додатково вводять також молібден і кобальт. Для маркування таких сталей використовують літери М і К та цифри, які вказують на їхню кількість у процентах (сталі Р6М5, Р9К5, Р18К5Ф2 та інші).

Для вимірювального інструменту використовують сталі Х, ХВГ після гартування і спеціального низького відпуску при 120...130 °С протягом 15...20 год з наступною обробкою при температурах нижче нуля (до -60 °С). З цих сталей виготовляють також штампи холодно-го деформування складної форми перерізом 75...100 мм. Для виготовлення інструменту з високою твердістю і зносостійкістю, а також незначною деформацією під час гартування використовують сталі типу Х12Ф1. Сталі з меншим вмістом вуглецю і підвищеною в'язкістю використовують для інструменту, що працює за значних ударних навантажень (пневматичні зубила, ножі для холодної різки тощо), наприклад сталі 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С та інші.

Сталі з вмістом вуглецю (0,5...0,6 %), леговані хромом (який підвищує міцність і прогартованість), а також вольфрамом і молібденом (підвищує твердість, теплостійкість, подрібнюють зерно), нікелем (підвищують в'язкість, прогартованість) і марганцем (заміняє нікель), використовують для виготовлення штамів гарячого деформування — сталі 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ.

Спеціальні леговані сталі — це високолеговані сталі з явно вираженими особливими властивостями (корозійна стійкість, жаростійкість, жароміцність тощо).

Неіржавіючі або корозійностійкі сталі володіють високою хімічною стійкістю в агресивних середовищах. Одержують їх введенням до складу низько- і середньовуглецевих сталей значної кількості хрому (не менше 12,5 %) і нікелю, а також додатково титану, алюмінію і марганцю. Найпоширеніші хромисті і хромонікелеві сталі. Залежно від структури розрізняють корозійно-стійкі сталі аустенітні (12Х18Н9, 12Х18Н10, 04Х18Н10, 10Х14Г14Н3), феритні (12Х17, 08Х17Т), мартенситні (40Х13), аустенітно-мартенситні (09Х15Н18Ю) та аустенітно-феритні (08Х21Н6М2Т).

Хромисті сталі найдешевші, але за корозійною стійкістю поступаються хромонікелевим. Так, сталь 12Х7 стійка у кислотних середовищах, але не придатна для використання при зварюванні, оскільки при нагріванні під час зварювання вище 900...950 °С і швидкому охолодженні границі зерен сталі збіднюються хромом. При вмісті ж менше 12 % Cr електрохімічний потенціал сталі стає негативним і вона втрачає здатність опиратись корозії. За таких умов

у сталі 12Х7 виникає небезпечний вид корозії — міжкристалічна корозія. Для запобігання цього використовують сталь, леговану титаном 08Х17Т.

Хромонікелеві сталі містять підвищену кількість хрому і нікелю, мало вуглецю і відносяться до аустенітного класу (сталь 12Х18Н9). Такі сталі, порівняно з хромистими, характеризуює висока корозійна стійкість. Вони здатні до міжкристалітної корозії. Тому в разі необхідності їх також додатково легують титаном (сталь 12ХН8Н9Т) або зменшують вміст вуглецю (сталь 04Х18Н10). Широко застосовують їх у харчовій, хімічній, нафтопереробній галузях промисловості, а також у транспортному машинобудуванні і будівництві. Для економії нікелю його частково замінюють марганцем. Так, сталь 10Х14Г14Н3 використовують як замітник сталі 12Х18Н9. Для експлуатації у кислотних середовищах підвищеної активності використовують сталі аустенітно-феритного класу, наприклад сталь 08Х21Н6М2Т тощо.

Розроблено також високолеговані сталі для агресивних середовищ (80 % розчин H_2SO_4) із складною системою легування елементами Cr, N, Mo, Cu.

Жаростійкі (жаровиностійкі) сталі — це такі, що здатні чинити опір корозійному руйнуванню під дією повітря або іншого газового середовища при високих температурах (400...900 °С). Жаростійкі сталі містять у своєму складі Al, Cr, Si і не утворюють жаровини. Стійкість таких сталей зумовлено утворенням на поверхні виробів щільних захисних плівок оксидів вказаних легуючих елементів. Так, для виробів з робочими температурами до 850...900 °С (клапани двигунів внутрішнього згорання) використовують сталі 40Х9С2, 08Х17Т; для температур до 1100 °С (сопла, жарові труби газових турбін) — сталі типу 36Х18Н25С2. Хромиста сталь з 30 % Cr стійка до температури 1200 °С. Жаростійкі сталі застосовують в основному для деталей нагрівального і енергетичного обладнань.

Жароміцні сталі — це такі, що забезпечують здатність виготовлених з них виробів витримувати механічні навантаження без деформації й руйнування за високих температур (500...1000 °С). Вони містять у своєму складі хром, кремній, нікель, молібден та інші елементи. Залежно від призначення розрізняють клапанні сталі, котлотурбінні, газотурбінні сталі, а також сплави з високою жароміцністю.

Для температур 300...500 °С використовують Cr — Si-сталі мартенситного класу (сільхром) типу 40Х9С2, 40Х10С2М. З них виготовляють клапани двигунів автомобілів і тракторів. Високолеговані аустенітні сталі типу 17Х18Н9 (гомогенні) або 45Х14Н14В2М (гетерогенні) — з дрібними карбідними або інтерметалідними фазами) використовують за температур 600...900 °С. Аустенітні сталі досить

міцні, але в'язкі і погано обробляються різанням. З них виготовляють парові котли, лопатки газових турбін, сопла реактивних двигунів тощо. Для більш високих температур (800...1000 °С) використовують хромонікелеві сплави — ніхроми і німоніки з мінімальним вмістом вуглецю (0,06...0,12 % С).

Вони містять більше 55 % Ni і переважають за властивостями кращі жароміцні сталі. За структурою їх поділяють на гомогенні (ніхроми ХН60Ю, ХН78Т та інші) і гетерогенні (німоніки ХН77ТЮ, ХН77ТЮР тощо), леговані, окрім хрому, ще й елементами, які утворюють з нікелем дисперсні інтерметалідні зміцнюючі фази типу (Ni, Co, Cr)₃Ti, (Ni, Co, Cr)₃Al тощо. Маркування нікелевих сплавів здійснюють літерами, які означають елементи, і цифрами, що вказують на вміст нікелю. Так, сплав ХН70ВМТЮ містить 70 % Ni, а також Cr, W, Mo, Ti, Al. Жароміцні сплави на основі кобальту використовують обмежено, наприклад для лопаток соплового апарата реактивних двигунів.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються сталь і чавун?
2. Чим відрізняються метастабільна і стабільна діаграма стану системи залізо—вуглець?
3. Що означають основні лінії і особливі точки на діаграмі залізுவуглецевих сплавів системи Fe — Fe₃C?
4. Які основні фази утворюються в залізுவуглецевих сплавах (сталах, чавунах)?
5. Що таке критичні точки температури?
6. У якому вигляді знаходиться надлишковий вуглець у білому чавуні?
7. Як і за якими ознаками класифікують вуглецеві сталі?
8. Як і за якими ознаками класифікують чавуни?
9. Як маркують вуглецеві сталі і промислові чавуни?
10. Леговані сталі, їх класифікація і маркування.
11. Наведіть приклади легованих зносостійких, інструментальних, корозійностійких сталей
12. Який вміст вуглецю у легованих конструкційних (цементованих і поліпшуваних) сталях?

Глава 5

Основи термічної обробки

§ 5.1

Загальні уявлення

У сучасному машинобудуванні *термічна обробка* є найбільш поширеним способом зміни структури та властивостей металів і сплавів. Це технологічний процес теплової обробки металів і сплавів з метою зміни їхньої структури та властивостей шляхом нагрівання і охолодження. Результатом термічної обробки є зміцнення або знеміцнення сплаву (сталі). Проте термічна обробка ефективно впливає на властивості лише тих сплавів, які мають не менше двох фаз, здатних до перетворення при нагріванні і охолодженні. Так, залізовуглецеві сплави (сталі) мають дві поліморфні модифікації: на основі α -заліза (ОЦК-гратка) і γ -заліза (ГЦК-гратка), які зумовлюють можливість проведення термічної обробки сталей. Наукові основи термічної обробки було закладено Д. К. Черновим у 1868 р. відкриттям критичних температур (точок A_1 і A_3), за яких відбуваються фазові перетворення при нагріванні і охолодженні сталі, та побудовою на їхній основі діаграми стану системи залізо — вуглець. Користуючись діаграмою стану, визначають області структурних перетворень і лінії (температури) їхньої рівноваги.

Будь-яка операція термічної обробки — це нагрівання металу до певної температури (t) з потрібною швидкістю нагрівання (V_H), витримування за цієї температури протягом певного часу (τ) й охолодження із заданою швидкістю (V_{ox}).

Залежно від температури нагрівання розрізняють обробку з нагрівом до температур вище і нижче температури фазових перетворень (T_n). Температура нагрівання та швидкість охолодження визна-

чають вид термічної обробки. Так (рис.5.1), нагрівання вище температури фазових перетворень (T_2) і подальше повільне охолодження призводять до фізико-хімічної та структурної рівноваги сталі. Такі операції називають *в і д п а л ю в а н н я м*. Швидке ж охолодження заважає утворенню рівноважної структури, й таку операцію називають *г а р т у в а н н я м*.

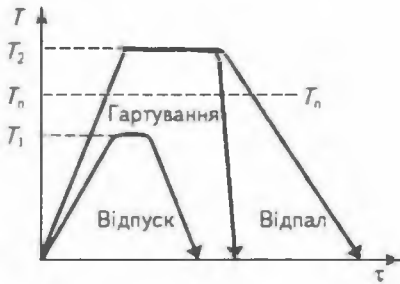


Рис. 5.1
Схематичне зображення різних
видів термічної обробки

Нагрівання до температури нижче за температуру фазових перетворень (T_1) сприяє наближенню до стану рівноваги. Вплив швидкості охолодження при цьому незначний. Такі операції термічної обробки називають *в і д п у с к о м*.

§ 5.2

Перетворення та основні структури при нагріванні та охолодженні сталі

Основою всіх перетворень є прагнення системи до мінімуму вільної енергії. Фазові перетворення в сталі відбуваються внаслідок зміни умов (наприклад, температури), коли один стан системи стає менш стабільним за інший.

Розрізняють такі основні структурні стани під час термічної обробки сталі:

- аустеніт (А) — твердий розчин вуглецю (С) в γ -залізі Fe_γ ;
- мартенсит (М) — перенасичений твердий розчин вуглецю в α -залізі Fe_α (С);
- перліт (П) — евтектоїдна суміш фериту (Ф) і цементиту $Fe_\alpha + Fe_3C$.

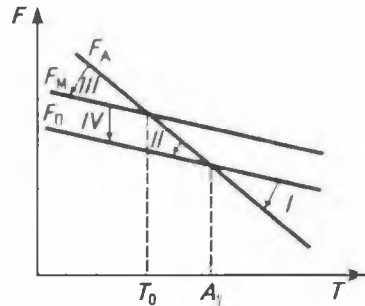


Рис. 5.2

Зміна вільної енергії (F) аустеніту (F_A), мартенситу (F_M) та перліту (F_P) залежно від зміни температури

У процесі нагрівання та охолодження ці структури переходять одна в одну (рис. 5.2) за рахунок зміни запасу внутрішньої вільної енергії (F). На рис. 5.2 T_0 — це температура, за якої запас вільної енергії аустеніту і мартенситу однаковий, точка S за діаграмою стану Fe — Fe₃C (див. рис. 4.1) відповідає температурі $A_1 = 727^\circ\text{C}$.

Перетворення перліту в аустеніт ($P \rightarrow A$) відбувається за нагрівання сталі, згідно (рис. 5.3) лівої частини діаграми Fe — Fe₃C (див. рис. 4.1), вище за температуру критичної точки A_1 (727°C , лінія PSK). Нагадуємо, що перліт — неоднорідна (гетерогенна) структура, а аустеніт — однорідна (гомогенна). Тому за нагрівання вище 727°C мають відбуватися процеси дифузії атомів вуглецю для досягнення концентрації 0,8 %. Для цього потрібні час і перегрів вище за температуру A_1 . Швидкість перетворення зростає при підвищенні температури.

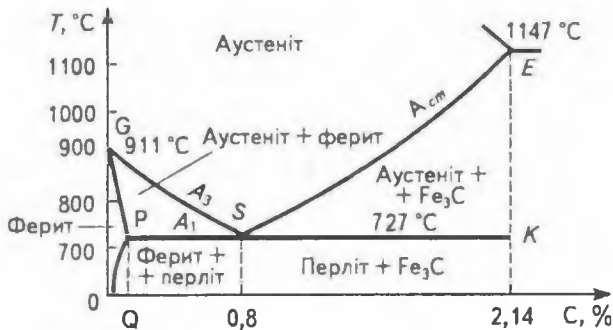


Рис. 5.3

Нижня ліва частина (сталева ділянка) діаграми стану Fe — Fe₃C

При нагріванні евтектоїдної сталі (0,8 % С) вище за точку A_1 (740...800 °С) на межі фериту і цементиту починається перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ з утворенням низьковуглецевого аустеніту, в якому розчинюється цементит (рис. 5.4, б, в). Перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ відбувається швидше, ніж розчинення цементиту. Тому, коли вся α -фаза (ферит) перетвориться на γ -фазу (аустеніт), частина цементиту залишиться нерозчиненою (рис. 5.4, д), і лише після розчинення всього цементиту перетворення закінчується (рис. 5.4, е). Проте аустеніт, що утворився, має досить нерівномірну концентрацію вуглецю, яка зменшується від центру до периферії зерна. Лише після тривалого нагрівання або підвищення температури внаслідок дифузії аустеніт стає однорідним щодо вмісту вуглецю.

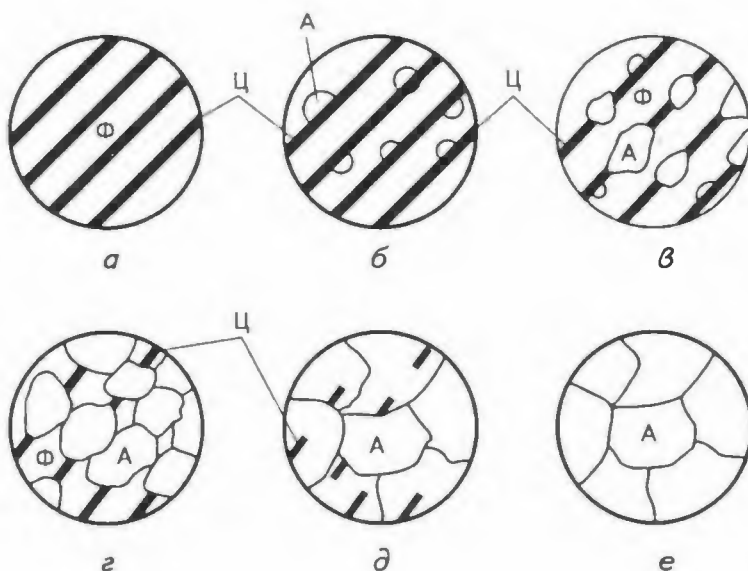


Рис. 5.4

Схема утворення зерен аустеніту під час перетворення перліту при нагріванні сталі

Доевтектоїдні сталі за температур вище температури A_1 мають структуру аустеніт + ферит і лише вище за температури A_3 (лінія GS діаграми) набувають однорідної структури аустеніту.

У разі нагрівання заевтектоїдних сталей вище A_1 (подібно до евтектоїдних) перліт спочатку перетворюватиметься на аустеніт, а з

підвищенням температури вторинний цементит розчинюватиметься в аустеніті. Вище температури A_{cm} (крива SE діаграми) розчинення цементиту закінчується і утворюється однорідний аустеніт. Оскільки аустеніт утворюється на межі фериту і цементиту, то утворювання

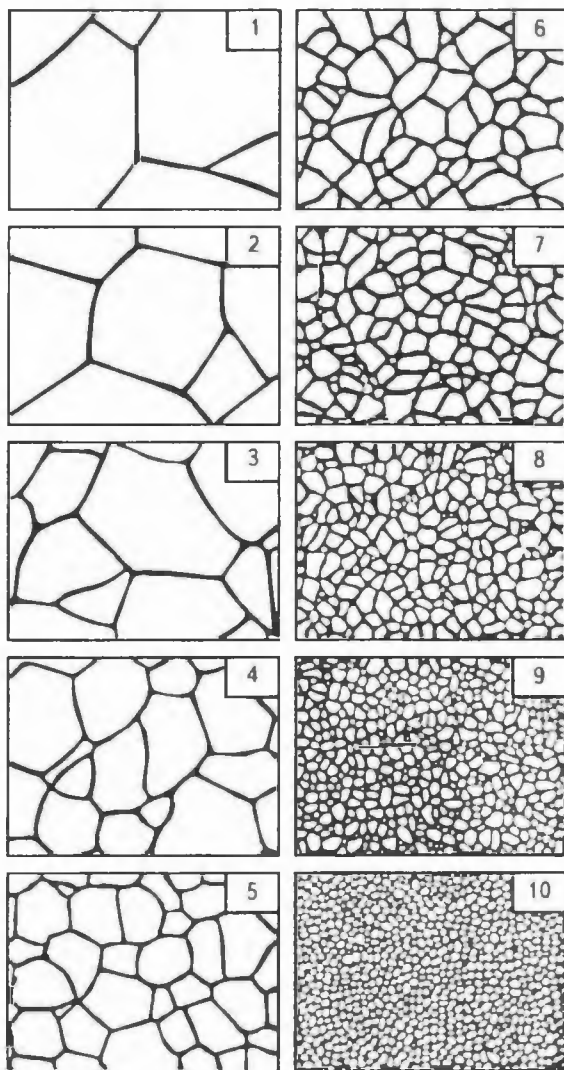


Рис. 5.5

Шкала для визначення
розміру зерна:

1 — 10 — номери зерен
при збільшенні, $\times 100$

перліту з дрібною структурою і з більшою протяжністю границь зерен відбувається швидше.

З підвищенням температури зростає швидкість утворення центрів кристалізації аустеніту, а також швидкість росту його зерен. Залежно від схильності до зростання розмірів аустенітного зерна за підвищення температури, розрізняють *спадково дрібнозернисту* сталь і *спадково крупнозернисту*. Спадковість зерна залежить від хімічного складу сталі, умов виплавки та тверднення, неметалевих вкраплень тощо. За певних умов (наприклад, при перегріві) зерно дрібнозернистої сталі може перевищувати розміри зерен крупнозернистої.

Такі елементи, як V, Ti, Mo, W, Al сприяють зменшенню росту зерна, а Mn, P — зростанню його розміру. Оскільки поняття спадковість зерна вказує на схильність аустенітного зерна до зростання з підвищенням температури, то введено також поняття *дійсного зерна*. Тобто такого зерна, розмір якого зумовлений конкретною температурою нагріву, тривалістю нагрівання і схильністю до росту зерна при нагріванні. Розміри зерна аустеніту на практиці визначають за стандартними методиками: цементациєю, окисленням, за феритною або цементитною сіткою, протравлюванням границь зерен спеціальними травниками і співставленням одержаних структур зі стандартними шкалами бальності (рис. 5.5).

Перетворення аустеніту на перліт ($A \rightarrow P$) відбувається в процесі охолодження сталі від температур аустенітного стану до кімнатної температури. Перетворення (розпад) може відбуватися лише за температур, нижчих від критичної точки A_1 (727°C), за умови, що вільна енергія аустеніту вища за вільну енергію продуктів його перетворення. Тобто аустеніт має бути переохолодженим. Від ступеня переохолодження (температури), за якого відбувається перетворення, залежать швидкість перетворення та структурний стан продуктів розпаду аустеніту.

Розрізняють три основні етапи перетворення аустеніту під час охолодження:

- перетворення $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ (ГЦК $\rightarrow$ ОЦК-гратка);
- зародження центрів кристалізації цементиту (Fe_3C);
- зростання зерен цементиту.

Внаслідок цих процесів відбувається утворення і зростання пластинчастих кристалів фериту і цементиту, що утворюють перлітну колонію (рис. 5.6).

Залежно від швидкості охолодження (ступеня переохолодження) утворюються різні типи структур, зумовлені повнотою проходження

трьох основних етапів перетворення й відповідно дисперсністю структурних складових сталі.

При швидкості охолодження $V_{ox} \leq 30$ °C/с реалізуються всі етапи перетворення і формується структура пластинчастого перліту з міжпластинчастою відстанню $\Delta_0 = 0,6...1,0$ мкм і твердістю 180...250 НВ. Збільшення швидкості охолодження до 50 °C/с дає змогу реалізувати перший та другий етапи перетворення повністю, а третій — лише частково. При цьому утворюється дисперсніша ферито-цементитна суміш ($\Delta_0 = 0,25...0,3$ мкм, 250...300 НВ) — сорбіт. При $V_{ox} = 100$ °C/с сповна реалізується лише перший етап, другий — тільки частково, а третій зупиняється одразу ж на початку

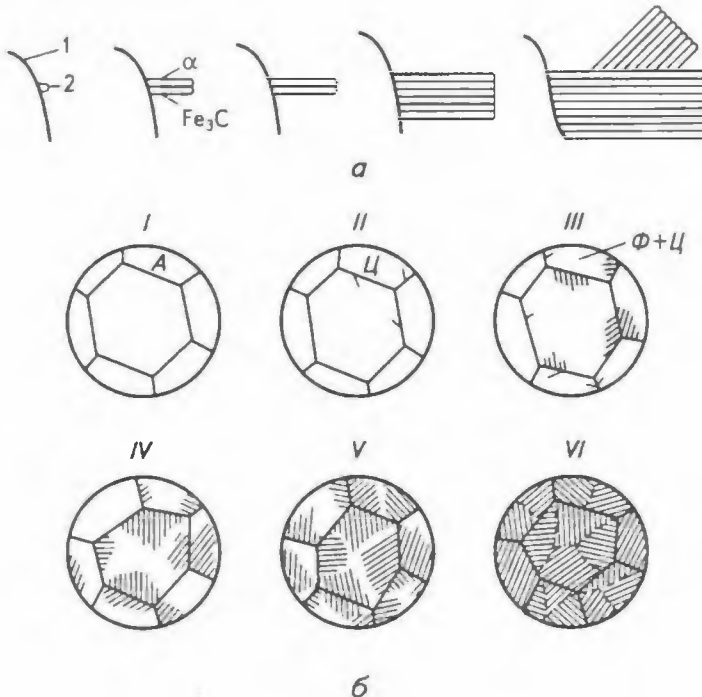


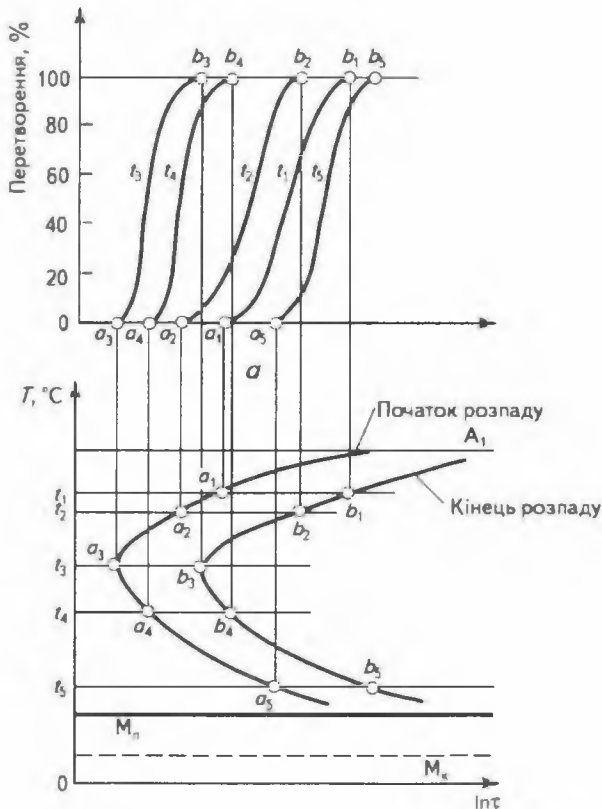
Рис. 5.6

Схема зародження і росту перлітної колонії (а) та утворення перлітного зерна (б):

1 — границя зерна аустеніту; 2 — зародок цементиту;
I — VI — етапи перетворення

перетворення. Тому утворюється дуже дрібна структура ферито-цементитної суміші — троостит ($\Delta_0 = 0,1 \dots 0,15$ мкм, 350...450 НВ), будову якого можна спостерігати за великих збільшень ($\times 7000 \dots 8000$). Швидкість охолодження $V_{\text{ох}} = 150 \dots 200$ °C/с дає змогу реалізувати лише перший (бездифузійний) етап перетворення з утворенням структури мартенситу (65 HRC).

Перліт, сорбіт і троостит, які утворюються під час дифузійного розпаду переохолодження аустеніту, є ферито-цементитними структурними



б

Рис. 5.7

Схема побудови кінетичних кривих (а) і діаграми ізотермічного перетворення аустеніту (б)

турами пластинчастої будови, що вирізняються лише ступенем дисперсності (подрібнення).

Якщо сталь, нагріту до аустенітного стану, швидко охолодити нижче за критичну точку A_1 , а далі витримувати за певної постійної температури, то перетворення аустеніту на ферито-цементитну суміш відбуватиметься протягом певного часу. Такий процес перетворення аустеніту за постійної температури (ізотермічний процес) можна охарактеризувати так званими кінетичними кривими для різних ступенів переохолодження (рис. 5.7, а). За умов невеликого переохолодження різниця вільних енергій аустеніту і перліту незначна. Тому перетворення відбувається з певним періодом інертності. Тобто існує інкубаційний період до початку перетворення, що дорівнює відстані від точки 0 до точки a на осі часу (рис. 5.7, а). Точка a кінетичної кривої показує початок перетворення (1 % перліту), а точка b — закінчення. Від ступеня переохолодження залежить не лише тривалість інкубаційного періоду, а й швидкість перетворення. За малого переохолодження (t_1) перетворення йде повільно внаслідок малої різниці вільних енергій аустеніту і перліту. У разі зростання ступеня переохолодження швидкість стає оптимальною (при t_3), а потім, за значного переохолодження (при t_4 і t_5), швидкість знову зменшується у зв'язку з малою дифузійною рухливістю атомів. Це й демонструють кінетичні криві (рис. 5.7, а), за якими можна побудувати діаграму ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 5.7, б). Для цього в координатах час (вісь абсцис) і температура розпаду аустеніту (вісь ординат) наносять точки a і b кінетичних кривих у міру зниження температури (ступеня переохолодження). Поєднуючи точки a_1, a_2 і т. д., одержують криву початку ізотермічного перетворення аустеніту (ліва крива діаграми), а поєднуючи точки $b_1, b_2, \dots, b_5$ — праву криву закінчення перетворення. Одержані криві нагадують літеру С, тому їх називають С-кривими. У англійськомовних виданнях їх називають ТТТ-діаграми (time — temperature — transformation).

В області між вертикальною віссю і кривою початку перетворення аустеніт перебуває в переохолодженому стійкому стані (інкубаційний період). Мінімальний час існування переохолодженого аустеніту до початку його перетворення на ферито-цементитну суміш називають *стійкістю аустеніту* (час від 0 до a_3 на рис. 5.7, б). Залежить вона головним чином від вмісту вуглецю і легуючих елементів, є важливою характеристикою при термічній обробці сталей. Оскільки розпад аустеніту може здійснюватися від кількох се-

кунд до кількох годин, для зручності побудови діаграми використовують логарифмічну шкалу часу ($\ln \tau$).

Горизонтальні лінії M_n і M_k показують температуру початку та закінчення бездифузійного мартенситного перетворення. Діаграма, наведена на рис. 5.8, характерна для ізоtermічного перетворення

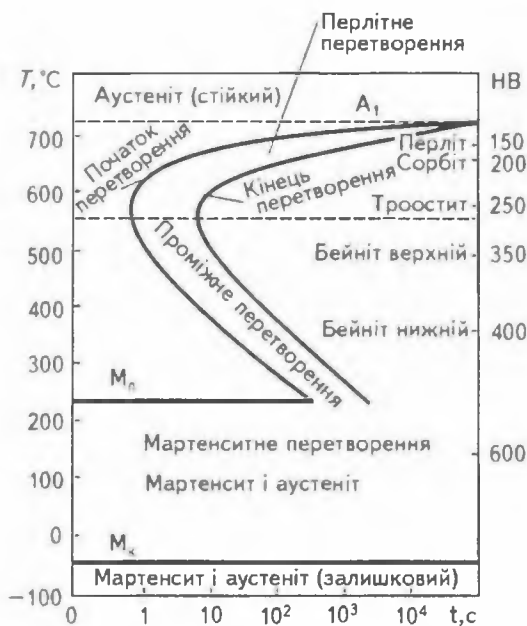


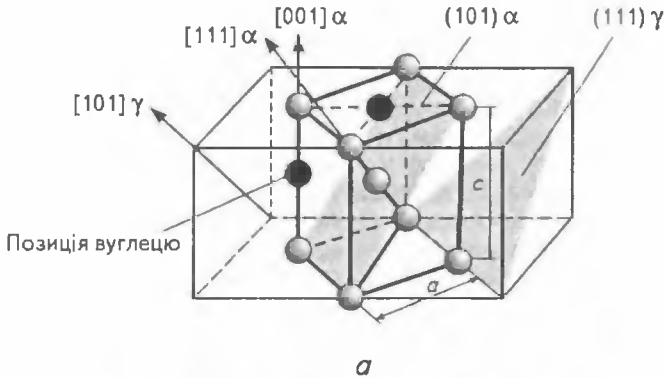
Рис. 5.8
Діаграма ізоtermічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі (0,8 % C)

евтектоїдної (0,8 % C) сталі. Якщо замінити умовно позначені температури конкретними, то діаграма набуде вигляду, зображеного на рис. 5.8. На ній, залежно від ступеня переохолодження аустеніту, розрізняють три температурні області перетворення: перліту (від точки A_1 приблизно до 550°C), проміжного перетворення (від 550°C до точки M_n), бейнітного і мартенситного (нижче точки M_n). Перлітне перетворення аустеніту відбувається у три етапи за дифузійним механізмом; мартенситне перетворення є бездифузійним процесом, а бейнітне (проміжне) поєднує в собі елементи перлітного та мартенситного перетворень.

Зазначимо, що практичне значення при визначенні режимів конкретних марок сталей має перетворення аустеніту в умовах безперер-

вного охолодження. За цих умов основні види перетворень (перлітне, бейнітне, мартенситне) відтворюють термокінетичні діаграми розпаду аустеніту.

Перетворення аустеніту в мартенсит ($A \rightarrow M$) має зовсім відмінну природу, не таку як при формуванні ферито-цементитних сумішей. Характерною особливістю аустенітно-мартенситного пере-



б

Рис. 5.9

Схема утворення тетрагональної комірки мартенситу на базі гратки аустеніту (а) та структура мартенситу (б), $\times 1000$

творення є його бездифузійність. *Мартенсит* — це пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі. У разі значного переохолодження (коли швидкість охолодження вища від критичної — $V_{кр}$) вуглець не встигає виділитися з аустеніту у вигляді цементиту, як це відбувається за утворення перліту, сорбіту і трооститу. Він залишається у кристалічній ґратці α -заліза, утворює пересичений твердий розчин і викликає внаслідок цього зміну ОЦК-ґратки на тетрагональну з елементарною коміркою у вигляді прямокутного паралелепіпеда (рис. 5.9). Атоми вуглецю у такій тетрагональній комірці розташовуються у міжвузлях або в центрі основи (сторона a), або посередині подовжених ребер (сторона c). Ступінь тетрагональності характеризує співвідношення параметрів c/a , яка зростає у відповідності зі збільшенням вмісту вуглецю у твердому розчині. Так, при вмісті у сталі 1,7 % С ступінь тетрагональності становить 1,08. Отже, мартенсит є пересиченим твердим розчином втілення вуглецю в α -залізі.

Перетворення аустеніту в мартенсит відбувається за охолодження у певному температурному інтервалі з початком у точці M_n (див. рис. 5.7 і 5.8), яка, на відміну від перлітного перетворення, не залежить від швидкості охолодження для даної сталі. Зі зниження температури дедалі більша кількість аустеніту перетворюється на мартенсит. Перетворення закінчується за температури точки M_k . Проте навіть при цьому не відбувається повного перетворення всього аустеніту в мартенсит. Частина аустеніту, що не перетворюється, називається **з а л и ш к о в и м а у с т е н і т о м**. Характерною особливістю мартенситного перетворення є призупинення перетворення у мартенситному інтервалі в разі зупинки безперервного охолодження (ізотермічного видержування), що супроводжується також стабілізацією аустеніту. Хімічний склад аустеніту зумовлює інтервал температур мартенситного перетворення, який знижується в разі підвищення вмісту вуглецю в сталі. Перетворення аустеніту з утворенням мартенситних пластин відбувається з великою швидкістю (≈ 1000 м/с), супроводжується збільшенням об'єму, орієнтованістю структури мартенситу, виникненням напружень та їхнім зростанням зі зростанням мартенситного кристалу. Кристали (пластини) мартенситу орієнтовані до границь зерна аустеніту під кутом 60° або 120° . Для мартенситного перетворення характерно також подрібнення блочної структури, утворення мікродвійників, підвищення густоти дислокацій. Все це, разом з утворенням твердого розчину втілення з тетрагональною кристалічною ґраткою, зумовлює високу міцність ($\sigma_B \approx 1000 \dots 1500$) і твердість ($60 \dots 65$ HRC) мартенситу. Структура мартенситу є результатом ґартування сталей (рис. 5.9, б).

Перетворення під час нагрівання (відпуску) загартованої сталі. Структура загартованої сталі є термодинамічно нестабільною, оскільки має підвищений рівень вільної енергії та викривлення (тетрагональність) кристалічної ґратки. Тому при нагріванні загартованої сталі до температур, нижчих за критичну A_1 ($727\text{ }^\circ\text{C}$), з наступним охолодженням (відпуск) вона намагатиметься перейти до стабільнішого стану, тобто до перетворення мартенситу і залишкового

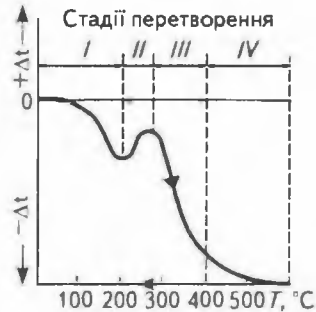


Рис. 5.10
Дилатометрична крива відпуску
вуглецевої (1,2 % C) сталі

аустеніту на ферито-цементитну суміш. Такі перетворення супроводжує зміна об'єму (довжини зразка). Нагадаємо, що мартенсит має найбільший об'єм, а аустеніт — найменший. Фіксуючи зміни об'єму при нагріванні сталі (дилатометричний метод), можна визначити ступінь та етапи перетворення загартованої сталі при відпуску (рис. 5.10). Якщо нагрівати відпалену сталь, то за відсутності перетворень дилатометр креслитиме лише горизонтальну лінію. В разі нагрівання загартованої сталі на кривій зміни довжини зразка спостерігаємо різні ділянки, що відповідають певним станам перетворення.

Так, в інтервалі температур $80\ldots 200\text{ }^\circ\text{C}$ на стадії I відпуску спостерігається скорочення довжини зразка, що відповідає так званому першому перетворенню при відпуску. Це пов'язується з поступовим зменшенням параметра c ґратки (ступінь тетрагональності наближується до 1), утворюється відпущений мартенсит з майже кубічною ґраткою. Зменшення тетрагональності можна пояснити виділенням вуглецю з твердого розчину з утворенням метастабільного ϵ -карбіду (має формулу близьку до Fe_2C). Тобто на першій стадії відпуску утворюється відпущений мартенсит — гетерогенна суміш пересиченого α -розчину неоднорідної концентрації і часток ще не обособленого ϵ -карбіду.

За подальшого нагрівання в інтервалі температур 200...300 °C на стадії II відпуску залишковий аустеніт перетворюється в гетерогенну суміш з пересиченого α -розчину і карбиду. Іншими словами, залишковий аустеніт перетворюється у відпущений мартенсит. Ці перетворення супроводжуються збільшенням довжини дилатометричного зразка.

На стадії III відпуску в інтервалі 300...400 °C спостерігається зменшення об'єму сталі, що зумовлюється цілковитим виділенням вуглецю з твердого розчину, обособленням і перетворенням ϵ -карбиду на цементит (Fe_3C), зняттям внутрішніх напружень. При 400 °C третє перетворення завершується, і сталь складається з фериту і цементиту (троостит відпуску).

На стадії IV за температури вище 400 °C відбувається активний процес коагуляції карбідних часток, який почався ще за температури 150 °C. Пластинчастий цементит переходить у глобулярну (зернисту) форму, утворюючи суміш фериту й цементиту. Структури, які утворюються під час відпуску, мають такі самі назви, що й структури прямого розпаду аустеніту на ферит і цементит. Після відпуску при 350...500 °C загартована сталь має структуру трооститу, при 550...600 °C — сорбіту відпуску (цементит у вигляді зерен 0,1...0,2 мкм), а при 650...700 °C — перліту відпуску (розмір глобулярних часток цементиту 0,3...0,4 мкм). Ці структури відрізняються за розміром цементитних часток і за твердістю. Різна форма часток цементиту, одержаного в результаті прямого розпаду аустеніту або в процесі відпуску загартованої сталі, зумовлює відмінності у властивостях металу. Тому в залежності від потрібного комплексу властивостей загартовані сталі піддають низькому (150...200 °C), середньому (300...400 °C) або високому (450...680 °C) відпускові.

§ 5.3

Вплив нагріву на структуру і властивості деформованого металу

Деформацією називають зміну розмірів і форми тіла під дією прикладених до нього сил. Розрізняють пружну і пластичну деформацію. П р у ж н а д е ф о р м а ц і я це така, що усувається при знятті навантаження. Вона не викликає помітних залишкових змін структури і властивостей металу — під дією прикладеного наванта-

ження відбувається лише незначне відносне й зворотне зміщення атомів. Після зняття навантаження зміщені атоми внаслідок дії сил притягування або електростатичного відштовхування повертаються у вихідний рівноважний стан і кристали металу набувають своєї попередньої форми та розмірів.

За умов зростання напружень на метал вище за певну величину деформація стає незворотною, і після зняття навантаження усува-

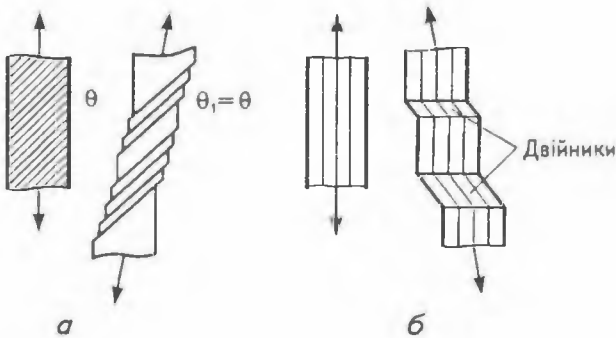


Рис. 5.11

Схеми пластичної деформації ковзанням (а)
і двійникуванням (б); θ — кут зсуву

ється лише пружна складова деформації. Частина ж деформації залишається і її називають пластичною. *Пластична деформація* не усувається після зняття навантаження і викликає незворотні зміни структури та властивостей металу. Вона здійснюється шляхом ковзання (зсуву) та двійникування (рис. 5.11). Зсув у кристалічній ґратці реалізується за площинами і напрямками з найщільнішим пакуванням атомів, де опір зсуву є найменшим. Площини і напрямки зсуву в цих площинах утворюють систему ковзання. В металах можуть існувати одночасно одна або кілька систем ковзання. Таким чином, зсув — це переміщення однієї частини кристалу паралельно іншій уздовж площини, яку називають площиною ковзання, або зсуву (рис. 5.11, а). В площині ковзання розташовані десятки дислокацій. Переміщення їх під дією дотичних напружень призводить до розвитку пластичної деформації та зміцнення металу.

Окрім ковзання, пластична деформація здійснюється також шляхом *двійникування*. Воно реалізується у разі зсуву однієї частини кристалу в нове положення, симетричне щодо другої частини криста-

лу відносно площини, яку називають *площиною двійникування* (рис. 5.11, б).

Під час двійникування відбувається переорієнтація — утворюється двійниковий прошарок. Кристалічна ґратка двійникового прошарку є дзеркальним відображенням ґратки в іншій частині кристалу.

Зміцнення металу в процесі пластичної деформації кристалу та полікристалічного тіла (наклепування) пояснюється зростанням кіль-

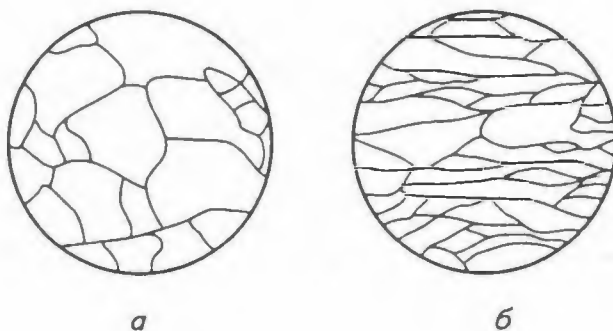


Рис. 5.12

Вплив пластичної деформації на структуру металу
(схема):

а — до деформації; б — після деформації

кості дефектів кристалічної будови (дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів). Підвищення густоти дефектів ускладнює рух окремих нових дислокацій і таким чином підвищує опір деформації та знижує пластичність металу. Метали з ОЦК- і ЦЦК-ґратками деформуються в основному ковзанням, метали ГЦП — як ковзанням, так і двійникуванням. Метали з ГЦК-ґраткою зміцнюються сильніше за метали з ОЦК-ґраткою.

Пластична деформація викликає також зміни мікроструктури полікристалічного металу. У разі зростання ступеня деформації та її розвитку в кожному зерні значно змінюється мікроструктура — зерна витягуються в напрямку пластичного плину металу. За значної деформації утворюється волокниста структура (рис. 5.12).

Усі внутрішні зміни під час пластичної деформації, такі як викривлення кристалічних ґраток, зростання густоти дислокацій та вакансій, зміни макро- і мікроструктури, поява текстури деформації, викликають зміцнення металу. При цьому характеристики міцності (σ_B , σ_T , твердість) зростають, а характеристики пластичності — зни-

жуються. Зміцнення металу під дією пластичної деформації називають *наклепуванням* (нагартуванням).

Деформований (наклепаний) метал є термодинамічно нестійким і тому намагається перейти у більш рівноважний стан з меншим рівнем вільної енергії. Процеси, за допомогою яких може відбутися цей перехід, здійснюються шляхом дифузії атомів в металі. Тому вирішальна роль у розвитку цих процесів належить температурі, з підвищенням якої зростає рухливість атомів і спроможність наклепаного металу до самодовільної перебудови структури. При нагріванні такого металу у ньому відбуваються процеси повернення, *полігонізації* і *рекристалізації*, які зумовлюють повернення всіх властивостей до рівня властивостей металу до деформації.

Під час нагріву металу до порівняно низьких температур (нижче $0,8...0,3 T_{пл}$) починається процес *повернення*. Під цим розуміють підвищення структурної досконалості наклепаного металу внаслідок зменшення густоти дефектів будови, однак без помітних змін структури при спостереженні за допомогою світлого мікроскопа. Розрізняють дві стадії цього процесу: перша стадія — повернення — протікає за температур нижче $0,2 T_{пл}$, коли відбувається зменшення кількості точкових дефектів (вакансій) і невелике перегруповання дислокацій без утворення нових субграниць; друга стадія — полігонізація (від лат. *polygon* — багатокутник) — реалізується при нагріванні до більш високих температур ($0,25...0,3 T_{пл}$). Під цим розуміють фрагментацію кристалів на субзерна (полігони) з малокутовими границями. Субзерна дуже малих розмірів і їх можна спостерігати лише за допомогою значних збільшень електронного мікроскопа. Субзерна при подальшому підвищенні температури або тривалості нагріву прагнуть до зростання. Нагрівання до більш високої температури призводить до різкої зміни структури і властивостей деформованого металу внаслідок *рекристалізації* — процесу виникнення і росту нових недеформованих зерен. Внаслідок рекристалізації наклепування практично цілком знімається і властивості металу наближаються до вихідних. Найменшу температуру початку рекристалізації T_p , за якої протікає рекристалізація і відбувається знеміцнення наклепаного металу, називають *температурним порогом рекристалізації*.

Ця температура не є постійною фізичною величиною. Температурний поріг рекристалізації знижується відповідно ступеню деформації, тривалості нагріву, величині зерна до деформації. Для технічно чистих металів він складає $0,4 T_{пл}$, для чистих знижується до $0,1...0,2 T_{пл}$, а для сплавів твердих розчинів зростає до $0,5...0,6 T_{пл}$.

Із завершенням первинної рекристалізації у процесі подальшого нагріву відбувається *збиральна рекристалізація*. Це процес росту одних рекристалізованих зерен за рахунок інших (сусідніх) рекристалізованих зерен. У реальному металі після первинної рекристалізації зерна мають неоднакові розміри. Границі зерен викривлені, мають підвищену протяжність. Внаслідок збиральної рекристалізації зерна зростають рівномірно, більш крупні ростуть за рахунок дрібних.

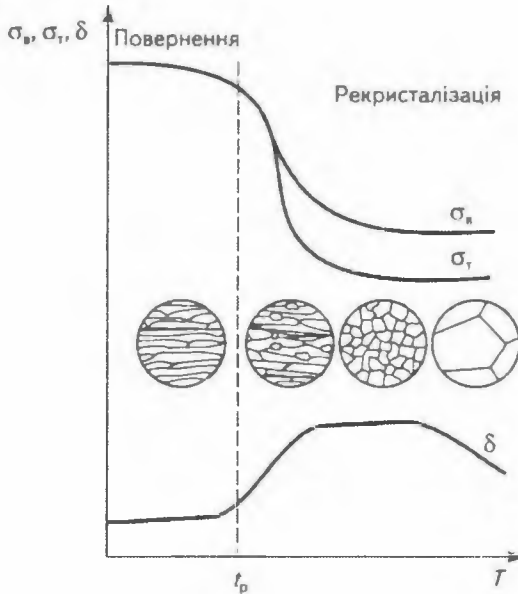


Рис. 5.13

Зміна характеристик міцності (σ_b, σ_T) і пластичності (δ) наклепаного металу при нагріванні; T_p — температура початку рекристалізації

За певних умов зерна можуть зростати нерівномірно, тому що ростуть і досягають великих розмірів лише окремі з них, тоді як основна структура зберігається дрібнозернистою. Такий процес називають *вторинною рекристалізацією*.

Чим більший ступінь попередньої пластичної деформації, тим менший розмір рекристалізованого зерна. Температура та тривалість нагріву також впливають на розмір рекристалізованого зерна.

Під час нагрівання пластично деформованого металу змінюються також його структура та властивості (рис. 5.13). В інтервалі температур повернення спостерігається незначне зменшення, яке залежить від природи металу і фактичної температури нагріву. Характеристики пластичності дещо підвищуються. В області температур первинної рекристалізації різко знижуються показники міцності та значно підвищується пластичність. Первинна рекристалізація призводить до повного зняття наклепування. Починаючи з певної температури, пластичність плавно знижується, що пояснюють утворенням великого зерна внаслідок збиральної рекристалізації. На практиці для повного зняття наклепування застосовують термічну обробку за режимом рекристалізаційного відпалу.

§ 5.4

Класифікація видів термічної обробки

Процеси термічної обробки характеризуються не лише температурою і тривалістю нагріву, швидкістю нагріву і охолодження, загальною тривалістю виробничого циклу. Вид термічної обробки перш за все визначає тип фазових і структурних змін у металі. Виходячи з цього, О. Бочвар розробив класифікацію, яка охоплює численні різновиди термічної обробки чорних і кольорових металів і сплавів. На основі класифікації О. Бочвара комісією зі стандартизації Ради Економічної Взаємодопомоги створено класифікацію видів і різновидів термообробки сталей і кольорових металів та сплавів, а також відповідну термінологію (рис. 5.14).

Згідно чинній класифікації види термічної обробки поділяють на:

- власне термічну (ТО);
- хіміко-термічну (ХТО);
- термомеханічну (ТМО).

Власне термічна обробка охоплює технологічні процеси: відпал першого роду, відпал другого роду, гартування з поліморфним перетворенням, гартування без поліморфного перетворення, відпуск, старіння. Кожен з цих видів термообробки поділяється також на різновиди, виходячи із специфіки сплавів. Вона зводиться лише до термічного впливу на метал або сплав.

Хіміко-термічна обробка поєднує в собі операції термічного і хімічного впливу з метою зміни хімічного складу, структури та

властивостей поверхневого шару металу або сплаву. Різновиди хіміко-термічної обробки: цементація, азотування, нітроцементація, борування, дифузійна металізація тощо.



Рис. 5.14

Схема класифікації основних видів термічної обробки металів і сплавів

Термомеханічна обробка об'єднує в одному технологічному процесі операції термічного впливу і пластичної деформації у різній послідовності. Різновиди термомеханічної обробки — високотемпературна (ВТМО), низькотемпературна (НТМО), ізоформінг тощо.

З окремими видами термічної обробки змушені стикатись як з побічними процесами під час гарячої обробки тиском, литті, зварюванні та за інших технологічних операцій.

§ 5.5

Технологічні процеси термічної обробки сталі

Відпал. Відпал першого роду частково або повністю усуває відхилення від рівноважного стану металу, які виникли внаслідок його попередньої обробки (лиття, обробка тиском, зварювання, термообробка). Під час відпалу першого роду фазові перетворення не відбуваються. Якщо ж вони все ж таки мають місце, то на властивості сталі істотно не впливають. Процеси, які усувають відхилення від рівноважного стану, здійснюються самодовільно, і нагрівання при відпалі першого роду здійснюють лише для їхнього прискорення. Основні параметри такого відпалу — температура і тривалість нагріву, швидкість нагрівання і охолодження мають другорядне значення.

Залежно від того, які відхилення від рівноважного стану усувають, розрізняють такі різновиди відпалу першого роду.

Рекристалізаційний відпал використовують для зменшення твердості наклепаної холоднодеформованої сталі, підвищення її в'язкості, одержання певного розміру зерна. Сталь для цього нагрівають до температури початку рекристалізації (нижче критичної точки A_1), витримують 3...6 год і повільно охолоджують до 500 °С і далі на повітрі. В результаті замість структури деформованого металу утворюється рівноважна дрібнозерниста, вільна від залишкових напружень структура.

Гомогенізуючий (дифузійний) відпал застосовують для вирівнювання хімічного складу та підвищення однорідності структури литої легованої сталі або для зниження схильності прокату до утворення флокенів і шиферності. Сталь для цього нагрівають вище температури точок A_3 і A_{cm} (1000...1150 °С) протягом 10...15 год і повільно охолоджують. Внаслідок цього утворюється однорідна структура з великим зерном, яке подрібнюють під час наступної термічної обробки або при прокатуванні.

Відпал на велике зерно застосовують для поліпшення оброблюваності сталі різанням. Оскільки структури з більшим зерном обробляються легше, штучно розмір зерна маловуглецевої сталі збільшують нагрівом до 950...1100 °С і повільним охолодженням її разом з піччю.

Відпал другого роду базується на використанні дифузійних (нормальних) фазових перетворень при охолодженні металів і сплавів. Принципову можливість застосування до сплаву відпалу другого роду

можна визначити за діаграмою стану. Його проводять для сталей і сплавів, які мають поліморфні, евтектоїдні або перетектоїдні перетворення, а також у разі перемінної розчинності у твердому стані. Практично доцільність відпалу другого роду визначає те, наскільки структурні зміни впливають на властивості сплаву. Відпал може бути здійснений з повним або частковим зміненням фазового складу.

Залежно від змін, що відбуваються у фазово-структурному стані, відпал може бути:

- повним;
- неповним;
- сфероїдизуючим;
- ізотермічним.

Повний відпал застосовують для зменшення твердості, внутрішніх напружень, структурної неоднорідності, подрібнення зерна, підвищення в'язкості й пластичності, поліпшення оброблюваності сталі. За повного відпалу відбувається фазова перекристалізація феритної та перлітної складових структури при температурі на 30...50 °С вище температури точки A_3 і охолодженні зі швидкістю 20...200 °С/год. Швидкість охолодження залежить від складу сталі, маси і форми виробів.

Неповний відпал використовують для зменшення твердості та покращання оброблюваності сталей різанням. При цьому відбувається перекристалізація лише перлітної складової структури. Після нагрівання до температури на 40...60 °С вище точки A_1 , витримування і повільного охолодження утворюються перліт і ферит у доевтектоїдних сталях та перліт і цементит у заевтектоїдних. Для заевтектоїдних сталей неповний відпал використовують замість повного.

Сфероїдизуючий відпал (сфероїдизація карбідів) застосовують для зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням високовуглецевих та інструментальних сталей, підвищення пластичності мало- і середньовуглецевих сталей перед холодним штампуванням і волочінням. Режим такого відпалу включає нагрівання до температури, трохи вищої від температури A_1 , повільне охолодження (30...40 °С/год) до 600 °С і далі на повітрі або циклічне багаторазове нагрівання вище температури точки A_1 і охолодження нижче цієї температури. За цих умов відбувається усунення пластинчастого і змішаного перліту та цементитної сітки, утворюється кінцева структура фериту та зернистого цементиту.

Ізотермічний відпал використовують для скорочення тривалості відпалювання прокату або заготовок після кування з легованих сталей. Здійснюють його нагріванням на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури точок A_1 або A_{cm} (для заевтектоїдних сталей) і витриманням за цих температур. Далі прискорено охолоджують до температури найменшої стабільності аустеніту ($650...680\text{ }^{\circ}\text{C}$) та витримують ізотермічно до повного розпаду аустеніту з подальшим охолодженням на повітрі. При цьому спочатку утворюється аустеніт, а потім відбувається його ізотермічний розпад на ферито-карбідну суміш. Кінцева структура після ізотермічного відпалювання — пластинчастий перліт і ферит, а в заевтектоїдних сталях — перліт і цементит.

Нормалізаційний відпал (нормалізація) є ефективним засобом усунення грубозернистої структури після лиття і кування. Для низьковуглецевих сталей використовується замість повного відпалу. Виливки середньовуглецевих сталей нормалізують замість гартування для зменшення короблення та тріщиноутворення. Нормалізацію з високим відпуском замість повного відпалу використовують для виправлення структури легованих сталей.

Нормалізацію здійснюють при температурах A_3 (для доевтектоїдних сталей) або A_{cm} (для заевтектоїдних) з наступним охолодженням на спокійному повітрі ($V_{ох} \approx 30\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$). При цьому отримують дрібне зерно і досягають рівномірного розподілу структурних складових сталей. Порівняно з відпалюванням, нормалізація є більш дешевою термічною операцією, оскільки у цьому випадку термічні печі використовують лише для нагрівання та витримання сталі при температурі нормалізації.

Гартування — це термічна операція, яка зводиться до нагрівання сталі до температури вище критичної (A_3 — для доевтектоїдної сталі та A_1 — для заевтектоїдної) або до температури розчинення надлишкових фаз і наступного швидкого охолодження зі швидкістю, що перевищує критичну. *Критичною швидкістю гартування* ($V_{кр}$) називають мінімальну швидкість охолодження, необхідну для розпаду аустеніту в інтервалі температур мартенситного перетворення (див. рис. 5.8). Тобто швидкість охолодження повинна бути досить великою, для того щоб при зниженні температури не встигли відбутися зворотні фазові перетворення, пов'язані з дифузією або само-дифузією. У цьому — принципова відмінність гартування від відпалу другого роду. Мета гартування — одержання нерівноважної структури і підвищення за рахунок цього міцності та твердості сталі.

Існують два різко відмінних види гартування:

- з поліморфним перетворенням;
- без поліморфного перетворення.

Гартування з поліморфним перетворенням — це термічна обробка, за якої головним процесом є мартенситне перетворення високотемпературної фази. Тому таку термічну обробку називають *гартуванням на мартенсит*. Таке гартування може бути застосоване практично до будь-яких металів і сплавів, здатних при охолодженні перебудувати кристалічну ґратку. Необхідну для проведення гартування швидкість охолодження забезпечують використанням певних середовищ з високою охолоджувальною здатністю (вода, масло, розчин солей тощо).

Гартування без поліморфного перетворення — це термічна обробка, яка фіксує при більш низькій температурі стан сплаву, властивий йому за високих температур. Воно зводиться до нагрівання сталі або іншого сплаву до температури розчинення надлишкових фаз, витримування і швидкого охолодження для запобігання виділень надлишкових фаз з пересиченого твердого розчину. Таку обробку здійснюють для одержання гомогенної структури.

Надалі ми будемо розглядати технологічні режими гартування з поліморфним перетворенням (рис. 5.15).

Залежно від температури нагрівання під гартування (аустенізації) розрізняють:

- повне;
- неповне гартування.

Повне гартування застосовують для обробки доевтектоїдних сталей. При цьому сталь нагрівають на 30...60 °С вище температури

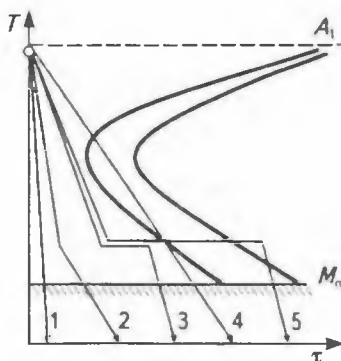


Рис. 5.15

Криві охолодження для деяких способів гартування, нанесені на діаграму ізотермічного розпаду аустеніти:

- 1 — безперервне; 2 — переривчасте;
- 3 — східникове; 4 — неповне;
- 5 — ізотермічне

точки A_3 (вище лінії GS на діаграмі стану, див. рис. 4.1) для отримання вихідної структури аустеніту.

Неповне гартування застосовують для заевтектоїдних сталей. Для гартування сталь нагрівають в інтервалі температур $A_1...A_3$ (на 30...50 °C вище A_1 , тобто до 760...780 °C). Вихідна структура при цьому — аустеніт з цементитом. Цементит зберігається і в загартованій структурі сталі, оскільки має вищу твердість порівняно з мартенситом.

При гартуванні слід розрізняти і розуміти два важливих поняття:

- загартованість;
- прогартованість сталі.

Загартованість — це здатність сталі набувати максимальної твердості внаслідок гартування. Загартованість визначає вміст вуглецю у сталі. Так, низьковуглецеві сталі (до 0,20 % C) практично не загартовуються, їхня твердість внаслідок гартування майже не підвищується.

Прогартованість — це глибина загартованої зони або відстань від поверхні зразка сталі до шару, структура якого складається приблизно з однакових об'ємів мартенситу та трооститу. Мірою прогартованості слугує критичний діаметр (D_K). Це максимальний діаметр циліндричного зразка, що наскрізь прогартувався у даному охолоджувальному середовищі. Прогартованість кожної сталі визначають експериментально.

Способи гартування сталі. Залежно від потрібного комплексу властивостей виробів, їх призначення та хімічного складу сталі застосовують різні способи гартування.

Найбільш широко застосовують гартування в одному охолоджувальному середовищі, переважно для деталей простої форми. Це *безперервне гартування*, охолоджуючим середовищем у більшості випадків слугує вода або масло. Кінцева структура — мартенсит і залишковий аустеніт або мартенсит, карбіди і залишковий аустеніт залежно від вмісту вуглецю в сталі.

Переривчасте гартування здійснюють у двох охолоджувальних середовищах: спочатку деталь швидко охолоджують у воді до температури дещо вище точки M_n , а потім швидко переносять до менш інтенсивного охолоджувача (масла, повітря), де охолоджують до 20 °C. У результаті використання другого охолоджуючого середовища зменшуються внутрішні напруження, які б мали місце за умов швидкого охолодження в одному середовищі (воді), в тому числі й в області температур мартенситного перетворення.

Сходинкове гартування використовують для зменшення напружень, деформації та запобігання утворенню тріщин в інструменті з

вуглецевих і легованих сталей. Сталь, нагріту до температури гартування, охолоджують у середовищі з температурою, дещо вищою M_n (180...250 °C), і витримують у ньому порівняно короткий час. Далі сталь охолоджують на повітрі до нормальної температури. Внаслідок видержування у середовищі гартування досягають вирівнювання температури за перерізом вибору, проте перетворення аустеніту з утворенням бейніту не відбувається. Мартенситне перетворення відбувається під час охолодження на повітрі (але значно повніше), внаслідок чого сталь зберігає більше залишкового аустеніту порівняно з режимом безперервного гартування.

Ізотермічне (бейнітне) гартування здійснюють охолодженням сталі у середовищі з температурою вище M_n (у розплавах солей), з ізотермічним витримуванням у ньому до повного або неповного перетворення аустеніту з наступним охолодженням на повітрі. Кінцева структура — бейніт або бейніт і карбіди, іноді також мартенсит і залишковий аустеніт. Таке гартування використовують для зменшення теплових і структурних напружень, запобігання тріщин і деформації, підвищення конструктивної міцності.

Гартування з самовідпуском здійснюють охолодженням лише частини або поверхні виробу у воді або маслі, далі виріб охолоджується на повітрі. Загартована зона при цьому відпускається за рахунок тепла серцевини або тієї частини, що не була занурена в охолоджуючу рідину. Таке гартування застосовують для зменшення залишкових напружень і як заміну наступного низького відпуску, а в окремих випадках — для місцевого гартування, при індукційному поверхневому гартуванні.

Поверхнєве гартування здійснюють для одержання твердої зносостійкої поверхні й збереження в'язкої серцевини. При індукційному або газоплазмовому нагріванні поверхні виробу серцевина після охолодження лишається незагартованою.

Гартування з обробкою холодом застосовують для усунення залишкового аустеніту, підвищення твердості й зносостійкості, стабілізації розмірів виробів. Обробку холодом виконують одразу після гартування, щоб уникнути стабілізації аустеніту при видержуванні за нормальних температур. Охолодження виробів здійснюють до температури нижче 0 °C (– 30 ... – 70 °C), але в інтервалі M_n — M_k , для додаткового перетворення аустеніту на мартенсит. Це підвищує твердість сталей з 0,8...1,1 % C на 1...3 HRC. Проте зростають напруження, тому після обробки холодом вироби піддають відпуску. Таку обробку використовують в основному для вимірювального інструменту, пружин і деталей з цементованих високолег-

ваних сталей, що після гартування зберігають значну кількість залишкового аустеніту.

Під час термічної обробки, перш за все при гартуванні сталі, відбуваються об'ємні зміни, які залежать від температури, швидкості охолодження і структурних перетворень. Це призводить до виникнення внутрішніх напружень, які зумовлюють утворення тріщин, короблення виробів тощо. Розрізняють такі внутрішні напруження:

Внутрішні напруження першого роду (зональні) виникають між різними частинами виробу і залежать від швидкості та рівномірності охолодження, розмірів і форми виробу, а також властивостей сталі. Такі напруження інколи називають *термічними напруженнями*.

Внутрішні напруження другого роду виникають між фазами внаслідок різних коефіцієнтів їхнього розширення або утворення нових фаз з різними об'ємами. Оскільки ці напруження виникають між окремими елементами структури, їх називають *структурними напруженнями*.

Внутрішні напруження третього роду виникають в об'ємах, що відповідають кільком елементарним коміркам кристалічної ґратки.

У цілому будь-які напруження, зрештою, викликають однаковий ефект, створюючи пружні деформації та викривлення кристалічної ґратки сплавів, зумовлюють зменшення конструкційної міцності виробів. Загартована сталь після охолодження завжди знаходиться у структурно напруженому стані (залишкові напруження). Необхідним і надійним заходом для зменшення негативного впливу залишкових напружень є відпуск. Після проведення відпуску при 550 °C протягом 15...30 хв напруження гартування практично зникають.

Відпуск загартованої сталі є завершальною операцією її термічної обробки, яка здійснюється для надання сталі потрібних механічних властивостей.

Відпуск — це нагрівання загартованої сталі до температур, нижчих A_1 , витримування її за цієї температури та поступове охолодження до кімнатної температури. Мета відпуску — переведення нерівноважної структури загартованої сталі у більш рівноважний стан, підвищення в'язкості та пластичності сталі, зменшення її твердості. Відпуском також знімають внутрішні напруження, які виникають під час гартування. Основний вплив на властивості сталі має температура відпуску. Залежно від температури розрізняють три види відпуску.

Низькотемпературний (низький) *відпуск* здійснюють при нагріванні сталі до 150...250 °C протягом 1,5...3 год. Під час цього тетра-

гональний мартенсит гартування перетворюється на мартенсит відпуску (кубічний), дещо знижується твердість і крихкість, зменшуються внутрішні напруження гартування. Такому відпуску піддають різальні та вимірювальні інструменти з вуглецевих і легированих сталей, а також вироби після цементації.

Середньотемпературний (середній) *відпуск* здійснюють при 300...450 °С для обробки деталей, що працюють за умов тертя і динамічних навантажень (штампи, пружини, ресори). Структура сталі для середнього відпуску — троостит відпуску або троостито-мартенсит, твердість сталі 40...50 HRC. Це забезпечує високий поріг пружності, в'язкості та опір розриву сталі.

Високотемпературний (високий) *відпуск* проводять при 500...680 °С. При цьому відбувається збільшення розміру і сфероїдизація дисперсних карбідних часток, зростає феритне зерно і утворюється сорбіт відпуску. Високий відпуск створює найкраще співвідношення міцності й в'язкості сталі. Тому термічну обробку, яка складається з гартування та високого відпуску, називають *поліпшенням*.

Високий відпуск застосовують для обробки деталей з середньовуглецевих (0,3...0,5 % С) і спеціальних сталей, що працюють при підвищених і динамічних навантаженнях (вали, осі, елементи кріплення). Високий відпуск протягом 1...2 год повністю знімає залишкові напруження, що виникають при гартуванні. Залежно від габаритів виробу тривалість високого відпуску може складати 1...6 год.

Після гартування, швидкого охолодження після відпуску або після холодної пластичної деформації сталі утворюється нерівноважна структура із мікрооб'ємами, пересиченими вуглецем і азотом.

Старіння — це процес зміни властивостей сталі, зумовлений виділенням надлишкового вуглецю (азоту) у вигляді дуже дрібних скупчень карбідів або нітридів. Старіння здійснюють нагріванням сталі до певної температури, витриманням при цій температурі з наступним охолодженням. Така обробка сприяє підвищенню твердості й міцності, зниженню пластичності та ударної в'язкості, а також зменшенню внутрішніх напружень.

Старіння може бути *природним* (за кімнатної температури) і *штучним* (при нагріванні до певної температури). Штучне старіння сталей здійснюють при 200...300 °С, тривалість нагрівання залежить від хімічного складу сталі. Старіння після термічної обробки називають *термічним старінням*, а після холодної пластичної деформації — *деформаційним старінням*.

Результати старіння можна розглядати по-різному. В одних випадках старіння є позитивним процесом і його використовують для

зміцнення деталей з пружинних сталей, які повинні забезпечити високі пружні властивості та міцність; при термічній обробці швидкорізальних сталей, а також сплавів алюмінію, магнію, титану тощо. В інших випадках старіння є негативним і може зумовлювати зниження ударної в'язкості та порога холодноламкості, руйнування конструкцій, залізничних рейок тощо.

Якщо під час експлуатації сталі можливе її нагрівання, коагуляція фаз, що виділились, і зниження міцності, то при старінні намагаються одержати такий рівень властивостей, що буде стабільним за даних умов експлуатації. Таке старіння називають *стабілізацією*.

§ 5.6

Хіміко-термічна обробка сталі

Хіміко-термічна обробка (ХТО) об'єднує операції хімічного і термічного впливу з метою цілеспрямованої зміни складу, структури та властивостей поверхневого шару сталі. Здійснюють ХТО дифузійним шляхом, насичуючи поверхню деталі відповідним елементом (С, N, Al, B, Cr, Si тощо) в атомарному стані з оточуючого середовища при високій температурі.

Основні технологічні параметри ХТО: • температура; • тривалість насичення. Основні процеси: • дисоціація; • адсорбція; • дифузія.

Дисоціація — це розпад молекул насичуючого середовища та утворення активних атомів дифундуючого елемента. Утворення активних атомів може відбуватись у насичуючому середовищі біля поверхні або безпосередньо на поверхні металу. Ступінь розпаду молекул речовини (%) називається *ступенем дисоціації*.

Адсорбція (сорбція) — складний і нестаціонарний процес поглинання поверхнею металу активних атомів насичуючого елемента, протікає на границі розділу середовище — поверхня металу. При збільшенні тиску насичуючого середовища кількість адсорбованих атомів збільшується.

Дифузія — процес проникнення насичуючого елемента вглиб металу. Характеризує її коефіцієнт дифузії (D), який дорівнює кількості речовини, що продифундувала через площу 1 см^2 за 1 с при перепаді концентрації по обидві сторони площадки, що дорівнює одиниці (1 має розмірність $\text{см}^2/\text{с}$). Оскільки хіміко-термічна обробка за своєю фізичною природою є дифузійним процесом, прискорити його можна за рахунок підвищення температури.

Види хіміко-термічної обробки класифікують відповідно до певного насичуючого елемента і агрегатного стану насичуючого середовища (карбюризатора). Основними видами ХТО є дифузійне насичення вуглецем — цементація, азотом — азотування, азотом і вуглецем одночасно — ціанування та нітроцементація, дифузійна металізація алюмінієм — алітування, хромом — хромування. Залежно від агрегатного стану насичуючого середовища (твердий, рідкий, газоподібний) розрізняють процеси газової цементації, газового азотування і нітроцементації, цементації у твердому карбюризаторі, рідкого ціанування, борування.

Цементація — це поверхнєве насичення маловуглецевої сталі (0,1...0,25 %) або легованих сталей (типу 18ХГТ, 15ХФ, 20ХГР, 12ХНЗА, 20ХН та інших) вуглецем з метою одержання високої твердості поверхні та в'язкої серцевини виробів. Насичуючі суміші (карбюризатори), багаті на вуглець, можуть бути у твердому, рідкому і газоподібному стані. При призначенні режимів цементації (температура, час) враховують хімічний склад сталі та умови експлуатації деталі.

Для цементації у твердому карбюризаторі використовують суміші деревного вугілля у вигляді зерен розміром 3...7 мм (75...90 %) з вуглекислими солями (10...25 %) барію або натрію. Дифузійне насичення виробів здійснюють у засипці карбюризатора в герметизованому об'ємі при температурі вище 900 °С протягом кількох годин. Присутність малої кількості кисню сприяє утворенню оксиду вуглецю за реакцією: $2C + O_2 = 2CO$, який, контактуючи з залізом, розпадається з утворенням CO_2 і атомарного вуглецю $2CO \rightarrow CO_2 + C_{ат}$.

Добавки вуглекислих солей активізують карбюризатор, збагачують насичуючу атмосферу оксидом вуглецю в цементаційному контейнері:



Швидкість цементації при 950 °С складає 0,1 мм/год. Цей вид цементації застосовують не часто.

Для цементації у рідкому стані деталь, що підлягає обробці, занурюють у розплати солей (наприклад, $NaCN$, Na_2CO_3 , KCl , $BaCl_2$, SiC) при 930...950 °С. У розплавленій суміші солей сталі насичуються вуглецем за рахунок виділення атомарного вуглецю.

Найпоширеніший спосіб газової цементації — з використанням метану CH_4 , пропану C_3H_8 , оксиду вуглецю CO тощо — зводиться переважно до двох реакцій:



Основні карбюризатори газової цементації — природний, генераторний та світільний гази. Цей процес здійснюють при 900...950 °С, при цьому у 2...3 рази скорочується час науглецьовування, зростають можливості регулювання й контролю за процесом.

За глибину цементації умовно приймають відстань від поверхні деталі до половини зони, у структурі якої спостерігається приблизно однакова кількість перліту та фериту (1...2 мм).

Вміст вуглецю у цементованому шарі визначає межа його розчинності в аустеніті за даної температури (лінія *SE* діаграми Fe — Fe₃C). Зазвичай цементацію здійснюють за температур, вищих *A₃*, оскільки в α -залізі вуглець майже не розчиняється. Оптимальний температурний інтервал цементації 900...950 °С.

Рекомендований середній вміст вуглецю в шарі повинен відповідати складу евтектоїдної сталі (0,85 % C), а у зовнішньому шарі — не перевищувати 1,1...1,2 %. У разі перевищення цієї кількості утворюється сітка вторинного цементиту, що призводить до окрихчення цементованої сталі. Нормальну структуру цементованого шару за умов повільного охолодження після насичення характеризує плавне зниження вмісту вуглецю. Біля поверхні (0,8...1,1 % C) цементований шар має перлітно-цементитну структуру (так звану евтектоїдну зону), далі — евтектоїдну зону з вмістом вуглецю приблизно 0,8 % з перлітною структурою і, нарешті, доевтектоїдну зону (вміст вуглецю менше 0,7 %) з ферито-перлітною структурою, яка поступово переходить у вихідну структуру низьковуглецевої сталі.

! Після цементації вироби піддають термічній обробці — гартуванню та низькому відпуску.

Цим забезпечується утворення структури дисперсного високовуглецевого мартенситу поверхні, подрібнення зерна серцевини і зняття внутрішніх напружень. Цементация, гартування і низький відпуск надає виробам високої поверхневої твердості та зносостійкості, а також підвищення ударної в'язкості серцевини. Залежно від хімічного складу вихідної сталі твердість поверхні після такої обробки має становити 58...62 HRC, а серцевини — 20...35 HRC.

Азотування — це процес дифузійного поверхневого насичення сталевих виробів азотом у газоподібному або рідкому середовищі. Температурний діапазон азотування становить 470...600 °С. Відпо-

відно до діаграми Fe—N залізо і азот утворюють кілька фаз: α -фаза — азотистий ферит (вміст азоту при 20 °С становить приблизно 0,015 %, при 591 °С — 0,1 %); γ' -фаза — твердий розчин на основі нітриду заліза Fe_4N (5,6...5,95 % N_2); ϵ -фаза — твердий розчин на основі нітриду Fe_2N (8...11,2 % N_2); γ -фаза — твердий розчин азоту в γ -залізі (існує вище температури евтектоїдного перетворення 591 °С).

Отримані при азотуванні шари складаються з поверхневої нітридної зони та дифузійного підшару (зони внутрішнього азотування), що забезпечують широкий діапазон фізико-механічних властивостей азотованих виробів.

Залежно від умов експлуатації виробів розрізняють азотування для підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, втомної міцності та азотування для підвищення корозійної стійкості.

Азотування для підвищення поверхневої твердості проводять при 500...520 °С протягом 24...90 год. Вміст азоту в поверхневому шарі біля 10...12 %, глибина насичення 0,3...0,6 мм, твердість 1000...1200 HV. Для підвищення твердості й зносостійкості використовують спеціальні сталі (нітралої), до складу яких входять елементи, що утворюють нітриди (CrN , MoN , AlN), наприклад сталь 38ХМЮА. Для підвищення втомної міцності звичайні леговані сталі азотують з нітридоутворюючими елементами.

Підвищення корозійної стійкості досягають азотуванням деталей з різних сталей (переважно з вуглецевих). Оскільки немає потреби у високій твердості, то температуру процесу вибирають високою (600...700 °С), а тривалість азотування складає від 15 хв до 10 год. На поверхні виробів утворюється тонкий шар (0,01...0,03 мм) ϵ -фази високої корозійної стійкості.

Азотування здійснюють на готових виробах після остаточної термічної обробки. Оптимальною структурою для азотування є сорбіт, який зберігається у серцевині виробів і після ХТО, забезпечуючи її підвищену в'язкість і міцність. Тому деталі перед азотуванням піддають зміцнюючій термічній обробці — гартуванню з високим відпуском.

Процес азотування також застосовується і при обробці виробів з високоміцних чавунів і титанових сплавів.

Ціанування і нітроцементация. Насичення поверхні виробів одночасно вуглецем і азотом в розплавлених ціанистих солях (NaCN , KCN , $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$) називають *ціануванням*, а в газовому середовищі — *нітроцементациєю*. Співвідношення вуглецю і азоту в дифузійній зоні можна регулювати, зміцнюючи склад середовища та температуру

процесу. Розрізняють низькотемпературне (540...560 °С), середньотемпературне (820...860 °С) та високотемпературне (920...960 °С) ціанування. За підвищених температур поверхня насичується вуглецем більше ніж азотом, тобто процес наближається до цементації. Після такого насичення вироби піддають гартуванню з низьким відпуском. Поверхневий шар після високотемпературного ціанування містить 0,8...1,2 % С і 0,2...0,3 % N. У разі ціанування при середніх і низьких температурах вміст азоту в дифузійному шарі відповідно зростає. Негативним явищем ціанування є отруйність ціанових солей та висока вартість процесу.

Нітроцементацію (газове ціанування) сталей здійснюють в ендотермічній атмосфері (що містить навуглицьовувальний газ), до якої додають аміак. Розрізняють високотемпературну (800...870 °С) та низькотемпературну (560...580 °С) нітроцементацію. Глибина насичення залежить від температури та тривалості (2...15 год) процесу. Порівняно з газовою цементацією нітроцементація має такі переваги:

- низька температура процесу;
- менше зерно;
- менша деформація і короблення;
- підвищена корозійна стійкість;
- стійкість проти спрацювання.

Дифузійна металізація — це процес, під час якого відбувається насичення поверхні сталевих виробів різними металами. Процес насичення алюмінієм називають алітуванням, хромом — хромуванням тощо. Розрізняють дифузійну металізацію у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Металізаторами твердої металізації служать сплави заліза з високим вмістом потрібного елемента (хрому, алюмінію, кремнію) — феросплави з добавками хлористого амонію (NH_4Cl). Внаслідок реакції металізатора з HCl або Cl_2 утворюється летюча сполука хлору з металом (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4 тощо), яка при контакті з поверхнею металу дисоціює з утворенням вільних атомів насичуючого елемента.

Якщо вироби занурюють у розплавлений метал, то відбувається рідка металізація, газова ж металізація відбувається у газових середовищах — хлоридах різних металів.

Оскільки, на відміну від вуглецю і азоту, атоми металів утворюють із залізом тверді розчинні заміщення, дифузія відбувається значно повільніше, а дифузійні шари утворюються у десятки й сотні разів тоншими. Це не сприяє значному поширенню процесів дифузійної металізації у зв'язку з тривалістю процесу та необхідністю застосу-

вання високих температур (1000...1200 °С). Проте дифузійна металізація дає змогу одержувати вироби зі звичайних вуглецевих сталей з високою жаростійкістю (хромування, алітування, силіціювання) до температур 1000...1100 °С або з високою твердістю до 2000 НV (буровання) і стійкістю проти спрацювання.

§ 5.7

Термомеханічна обробка

Відомо, що пластична деформація змінює характер розподілу та збільшує кількість недосконалостей кристалічної будови металів. Оскільки дефекти кристалічної ґратки значною мірою впливають на формування структури сплавів під час фазових перетворень, то пластичну деформацію перед фазовими перетвореннями або під час їхнього розвитку можна використовувати для створення оптимальної структури термічно обробленого сплаву.

Термомеханічна обробка (ТМО) — це деформаційно-термічна обробка, що включає пластичну деформацію, яка завдяки підвищеній густоті дефектів впливає на формування структури під час фазових перетворень, котрі відбуваються у процесі термічного впливу.

ТМО відкриває можливості значного підвищення міцності й ударної в'язкості (у 1,5...2 рази) при незначному зниженні пластичності порівняно з властивостями аналогічної сталі після гартування та низького відпуску.

Сутність ТМО зводиться до того, що перед фазовим перетворенням (або під час нього) здійснюють пластичну деформацію високо-температурної фази. Внаслідок цього під час гартування фазове перетворення відбувається в наклепаному або частково рекристалізованому стані. Підвищення міцності після ТМО пояснюють подрібненням зерен аустеніту внаслідок його деформації, подрібненням блоків і підвищенням густоти дислокацій у 3...4 рази порівняно зі звичайним гартуванням. Наступне гартування такого деформованого аустеніту зумовлює утворення дрібних пластин мартенситу та зменшення напружень другого роду. Це позитивно впливає на пластичність і в'язкість сталей.

Залежно від температури деформації розрізняють: • високотемпературну (ВТМО); • низькотемпературну (НТМО) термомеханічну обробку.

Високотемпературна термомеханічна обробка полягає у нагріванні сталі до температури, вище точки A_3 , витримуванні при цій температурі, пластичному деформуванні при температурах вище температури рекристалізації (T_p) й охолодженні (гартуванні) зі швидкістю, що перевищує критичну $V_{кр}$ (рис. 5.16, а). Суть ВТМО полягає в тому, що після гарячої деформації та гартування одержують твердий розчин з перекристалізованою структурою, тобто з підвищеною кількістю недосконалостей (вільних дислокацій, границь зерен, суб-

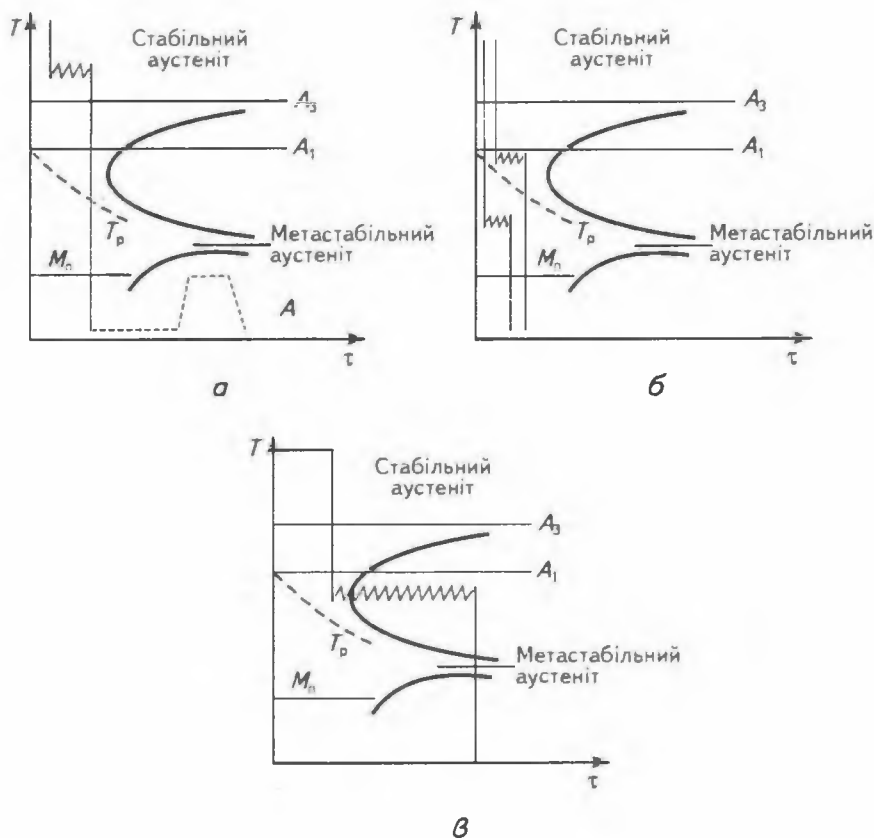


Рис. 5.16

Температурно-часові схеми режимів термомеханічної обробки:

а — ВТМО; б — НТМО; в — ізоформінг; T_p — температура рекристалізації;
 M_n — температура початку мартенситного перетворення; А — режим відпуску

зерен). При проведенні ВТМО слід виконувати три умови: одержувати по завершенню деформації перекристалізовану структуру; запобігати можливій рекристалізації по закінченню гарячої деформації; досягати необхідного для старіння ступеня пересичення твердого розчину. Підвищення властивостей сталі після ВТМО пояснюють тим, що мартенситне перетворення відбувається в сталі з певною субструктурою внаслідок деформації. Так, після ВТМО сталі 50ХН4М (нагрівання до 1050...1100 °С, деформація на 25...30 % при 900...950 °С, гартування, низький відпуск) досягають $\sigma_B = 2600...2700$ МПа, $\delta = 8...10$ %, КСЧУ = 56 Дж/см².

Низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО) складається з режимів нагрівання сталі до температури, вище точки A_3 (1100...1150 °С); охолодження до T_p — температури стабільності аустеніту (нижче A_1 і вище M_p — 450...550 °С); пластичної деформації при цій температурі на 75...95 %; охолодження (гартування) зі швидкістю, що забезпечує утворення мартенситу; низького відпуску при 150...200 °С (див. рис. 5.16, б). Внаслідок такої обробки σ_B підвищується до 2800...3000 МПа, δ — на 6...8 %, ударна в'язкість — у 1,5...2 рази порівняно зі звичайною термічною обробкою. Оскільки аустеніт піддають деформації у метастабільному стані, то доцільно у такий спосіб обробляти сталі зі значною стабільністю аустеніту в інтервалі температур деформування (у надмартенситній зоні). Іноді таку обробку за режимом НТМО називають *аусформінгом*.

Термомеханічну обробку, за якої сталь нагрівають вище точки A_3 , охолоджують до температури максимуму на кривій ізотермічного розпаду аустеніту (рис. 5.16, в) та деформують не тільки перед початком розпаду, але й під час усього процесу перетворення метастабільного аустеніту на перліт, називають *і з о ф о р м і н г о м*.

За всіх випадків при термомеханічній обробці перетворення відбувається після деформації сталі.

§ 5.8

Термічна обробка чавуну

Особливістю термічної обробки чавунів на відміну від сталі є необхідність строгого врахування структурного стану та властивостей вихідного чавуну. Специфічними процесами термічної обробки

чавунів є графітизація, тобто розкладання цементиту для зменшення кількості зв'язаного вуглецю; розчинення графіту і збагачення вуглицем аустеніту, що зумовлює збільшення кількості перліту у структурі чавуну.

Термічна обробка чавунів сприяє зменшенню внутрішніх напружень у виливках, одержанню стабільної структури і розмірів, підвищенню твердості та стійкості проти спрацювання у спосіб гартування та відпуску, надає чавуну (білому) підвищеної міцності та пластичності відпалюванням.

Основними видами термічної обробки сірого чавуну є:

- відпал;
- нормалізація;
- гартування (об'ємне, поверхневе);
- відпуск.

Низькотемпературний відпал (500...600 °С), або штучне старіння, протягом 1...8 год здійснюють повільним нагріванням (70...100 °С/год) і повільним охолодженням з піччю (20...50 °С/год) до 250 °С і далі — на повітрі. Застосовують його для зняття напружень, запобігання деформації й тріщиноутворення під час механічної обробки та експлуатації.

Середньотемпературний відпал (680...750 °С) — графітизуючий, застосовують для зменшення твердості, підвищення пластичності та ударної в'язкості, поліпшення оброблюваності. Залежно від потрібної структури тривалість відпалювання змінюють у межах 1...4 год.

Високотемпературний відпал (850...950 °С) — графітизуючий (0,5...5,0 год), використовують для зменшення твердості та поліпшення оброблюваності. Здійснюють повільним нагріванням і охолодженням з піччю до 250 °С, далі — на повітрі.

Н о р м а л і з а ц і ю (охолодження на повітрі) від 850...950 °С застосовують для підвищення твердості та зносостійкості.

Г а р т у в а н н я у воді або маслі від 850...930 °С з витримуванням при нагріванні 0,5...3,0 год використовують для підвищення твердості до 500 НВ, міцності та зносостійкості.

І з о т е р м і ч н е г а р т у в а н н я чавуну переважає традиційні види підвищення твердості та зносостійкості виробів, проте ускладнює обробку різанням. Воно зводиться до аустенітизації та наступного ізотермічного розпаду аустеніту в проміжній області С-подібної діаграми з утворенням переважно структури бейніту. Ізотермічне гартування чавуну складається з двох етапів:

- аустенітизації при 820...900 °С, витримування за цієї температури 0,2...1,5 год;

- переохолодження аустеніту з наступним розпадом його в ізотермічних умовах в інтервалі температур від 250...300 до 450...500 °С.

Швидко нагріваючи поверхню чавуну до 840...950 °С струмами високої частоти, газовим полум'ям тощо і охолоджуючи у воді, маслі та інших охолоджувальних середовищах здійснюють *поверхневе гартування*. Це забезпечує підвищення твердості до 55 HRC та стійкості проти спрацювання.

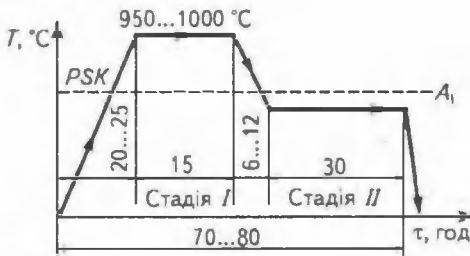


Рис. 5.17

Графік режиму графітізуючого відпалу для отримання ковкого чавуну

Відпуск виробів із сірих чавунів застосовують для усунення термічних напружень, підвищення в'язкості та пластичності. При цьому температура відпуску становить 250...600 °С, тривалість — 1...3 год залежно від потрібної твердості.

Термічну обробку білого чавуну проводять для одержання з нього ковкого чавуну з високою міцністю та пластичністю, застосовуючи для цього спеціальний режим графітізуючого відпалювання. Для цього використовують білий чавун з досить вузьким інтервалом вмісту легуючих елементів: 2,4...2,8 % С; 0,8...1,4 % Si; < 1 % Mn; ≤ 0,1 % S; ≤ 0,1 % P.

Під час графітізуючого відпалу цементит у чавуні розпадається з утворенням фериту і графіту або перліту і графіту. Феритний ковкий чавун на зламі має темний колір, тому його називають *чорносердечним*. Злам перлітного чавуну сірий і його називають *білосердечним*.

Сучасний процес графітізуючого відпалу складається з двох стадій (рис. 5.17). Перша стадія — рівномірне нагрівання до 950...1000 °С. За цієї температури відбувається графітізація надлишкового цементиту (10...15 год), потім чавун охолоджують з пічкою до 740 °С зі швидкістю 70...100 °С/год.

Друга стадія — ізотермічна обробка за такої температури (протягом майже 30 год), після чого чавун охолоджують на повітрі. На цій стадії графітізується цементит перліту. Остаточна структура після

графітізуючого відпалювання складається з фериту та пластівчастого графіту.

Перлітний ковкий чавун отримують у результаті неповного відпалювання: після першої стадії графітизації при 950...1000 °С чавун охолоджується з піччю, друга стадія графітизації не проводиться. Для підвищення в'язкості перлітний чавун піддають сфероїдизації при 700...750 °С, за якої отримують структури зернистого перліту.

При термічній обробці ковких чавунів для підвищення міцності та зносостійкості їх піддають гартуванню з відпуском або нормалізації. Гартування здійснюють від 850...900 °С з охолодженням у маслі або воді, відпуск — залежно від потрібної твердості (у більшості випадків при 650...680 °С). Гартування можна здійснювати також після першої стадії графітизації по досягненні температури 850...880 °С з наступним високим відпуском. Застосовують також режим поверхневого гартування.

Нормалізацію ковкого чавуну здійснюють нагріванням до 850...900 °С з витримуванням 1...1,5 год і наступним охолодженням на повітрі. Якщо нормалізовані вироби мають підвищену твердість, їх після цього піддають високому відпуску при 650...680 °С протягом 1...2 год.

Термічну обробку високоміцного чавуну проводять для того, щоб зняти внутрішні напруження (на 80...90 %) виливків складної форми. Для цього їх повільно нагрівають до 500 °С, витримують за цієї температури 2...3 год і охолоджують з піччю до 200 °С, а далі — на повітрі.

Виливки чавуну зі структурно вільним цементитом, для полегшення обробки їх різанням, піддають графітізуючому відпалу при 900...950 °С протягом 2...5 год з наступним охолодженням у печі.

Для підвищення порогу міцності й зносостійкості виливків відповідального призначення (колінчастих валів, коліс) застосовують нормалізацію від 900...950 °С (витримування 2...3 год). Далі здійснюють відпуск при 550...600 °С і охолодження з піччю.

Досить обмежено через можливість розтріскування використовують гартування від 900 °С у маслі для підвищення твердості та стійкості проти спрацювання.

Значне підвищення цих характеристик забезпечує також ізотермічне гартування за режимом: нагрівання до 850...880 °С, витримування 30...45 хв, перенесення до ванни з температурою 300...350 °С, витримування 60 хв і охолодження на повітрі. Для забезпечення втомної міцності важконавантажених виробів використовують поверхневе гартування струмами високої частоти від 900...1100 °С. Температуру вибирають залежно від структури вихідного чавуну.

Хіміко-термічна обробка чавуну. Азотування. Для азотування використовують переважно сірі чавуни, леговані хромом, нікелем, молібденом та іншими нітридоутворюючими елементами, а також високоміцний чавун. Азотування чавунів роблять для підвищення твердості до 600...1000 НВ, зносостійкості та корозійної стійкості в газовому середовищі. Процес здійснюють при 550...580 °С, тривалість (50...70 год) залежить від потрібної глибини азотованого шару, далі деталі охолоджують з піччю. Сірі чавуни попередньо відпалюють при 950...1000 °С протягом 4...12 год для розпаду цементиту. Для надання металевій основі після відпау високих механічних властивостей чавун гартують від 800...850 °С у маслі з короткочасним відпуском при 600 °С.

Перспективним є також процес азотування у тліючому розряді. Таке азотування значно підвищує стійкість за умов тертя і зношування, втомну міцність при знакозмінному вигині. Дифузійний шар, що утворюється при цьому, не крихкий і добре скріплений з дифузійним підшаром.

Алітування. Насичення виробів з чавуну алюмінієм здійснюють для підвищення жаротривкості. Застосовують такі самі режими, як і за обробки сталей. Найбільш поширене алітування чавуну в порошкових сумішах фероалюмінію протягом 2...6 год при 950...1050 °С після повільного нагрівання (до 500 °С). Після алітування вироби охолоджують з піччю або на повітрі.

Так само здійснюють *хромування* у твердому (10...12 год) або газовому (5 год) середовищах. Це забезпечує твердість поверхні 1600 НВ, підвищення жаростійкості та корозійної стійкості чавунів.

Для підвищення кислотостійкості та твердості поверхні ковкого і сірого чавунів застосовують *силіціювання* виробів з них у твердих або газових середовищах при 1000...1100 °С. Для отримання шару завтовшки 0,5...0,8 мм на виливках ковкого чавуну потрібна тривалість насичення 20...25 год. За цей же час на виливках сірого чавуну утворюється шар завтовшки 0,1 мм. Найкращі результати при силіціюванні одержують на ковких чавунах, задовільні — на сірих.

Для полегшення механічної обробки чавуну різанням використовують *сульфідуювання* його виливків. Здійснюють його шляхом повільного нагрівання до 550...600 °С в середовищах, що містять сірку. Для отримання дифузійного шару завтовшки 0,3 мм тривалість насичення повинна складати 3 год. Охолодження після хіміко-термічної обробки здійснюють на повітрі.



Контрольні запитання

1. Що таке термічна обробка, її основні параметри?
2. Назвіть основні перетворення, які відбуваються при нагріванні і охолодженні сталі.
3. Які основні структури можуть утворюватися при термічній обробці сталі?
4. Як класифікують основні види термічної обробки?
5. Що таке відпал сталі?
6. Чим відрізняються відпал першого і другого роду?
7. Що таке гартування сталі та які існують види гартування?
8. Що таке загартованість і прогартованість сталі?
9. Що таке внутрішні напруження?
10. Що таке відпуск сталі?
11. Які перетворення відбуваються під час відпуску?
12. Які види відпуску існують?
13. Що таке старіння сталі?
14. Назвіть основні параметри і процеси хіміко-термічної обробки.
15. Що таке цементация, її основні види?
16. Чим відрізняються процеси цементації, азотування і нітро-цементації?
17. Що таке термомеханічна обробка?
18. Чим відрізняються високотемпературна і низькотемпературна термомеханічні обробки?

Глава 6

Кольорові метали і сплави

Кольорові метали мають комплекс цінних властивостей, таких, наприклад, як теплопровідність (алюміній, мідь), низьку температуру плавлення (свинець, олово), малу питому вагу (алюміній, магній) тощо. Проте застосування їх у чистому вигляді досить обмежене. Широко застосовуються у промисловості сплави кольорових металів — латуні, бронзи, бабіти (на основі міді, цинку, олова, свинцю), а також дюралюміні і силуміни (на основі алюмінію), сплави на основі титану, магнію. На основі кольорових металів та їхніх сплавів створюються також композиційні матеріали та такі, що виготовляють методами порошкової металургії.

§ 6.1

Алюміній та його сплави

Алюміній — легкий метал третьої групи періодичної системи елементів, сріблясто-білого кольору, з густиною $2,7 \text{ г/см}^3$, високою електро-, теплопровідністю та корозійною стійкістю (утворює щільну поверхневу плівку оксиду Al_2O_3). Температура плавлення алюмінію, залежно від чистоти металу, становить $660...667^\circ\text{C}$. Прокатний і відпалений алюміній високої чистоти має міцність $\sigma_{\text{в}} = 60 \text{ МПа}$, модуль пружності $E = 7 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, пластичність $\delta = 50 \%$, $\psi = 85 \%$, твердість 25 НВ. Алюміній високопластичний, маломіцний матеріал, добре обробляється тиском, зварюється, але погано піддається обробці різанням. Як конструкційний матеріал його не застосовують.

Постійні домішки (Fe, Si, Ti, Mn, Cu, Zn, Cr) знижують фізико-хімічні характеристики і пластичність алюмінію. Залежно від вмісту домішок розрізняють марки алюмінію: А999 (0,001 % домішок), А995 (0,005 % домішок), А99 (0,010 % домішок), а також А97, А95.

Введення легуючих елементів дозволило створити низку алюмінієвих сплавів з різними фізико-механічними та технологічними властивостями. Сплави алюмінію поєднують у собі кращі властивості чистого алюмінію і підвищені характеристики легуючих елементів. Так, залізо, титан, нікель підвищують жароміцність сплавів: мідь, марганець, магній забезпечують зростання характеристик міцності. Легуванням і відповідною термічною обробкою досягають підвищення міцності алюмінію (σ_B) від 100 до 500 МПа, твердості — від 20 до 150 НВ.

За технологією виготовлення заготовок і виробів усі промислові сплави алюмінію поділяють на три групи:

- деформовані; • ливарні; • спечені.

Сплави, що піддають деформуванню, повинні забезпечувати високу технологічну пластичність для здійснення операцій прокатування, кування, пресування тощо. Тому вони повинні мати однорідну структуру твердого розчину на основі алюмінію. Для підвищення міцності допускають у структурі сплаву невелику кількість кристалів евтектики. Деформовані сплави алюмінію поділяють на такі, що зміцнюють термічною обробкою, і такі, що не зміцнюють.

До *термічно незміцнюваних сплавів* належать технічний алюміній (АД, АД1, АД0), сплави алюмінію з марганцем (позначають АМц) і сплави з магнієм та марганцем (позначають АМг). Вони володіють помірною міцністю, пластичністю, добре зварюються, корозійно стійкі. Залежно від стану поставки листу (0,5... 10 мм) у позначенні марки сплаву додають літери. В разі поставки сплаву у відпаленому стані пишуть літеру М — м'які (АМгМ), при незначному наклепуванні — літеру П (АМгП), при значному — літеру Н (АМгН). Із зростанням ступеня деформації (наклепування) підвищується міцність сплавів. Так, міцність і пластичність сплаву АМцН складає $\sigma_B = 220$ МПа, $\delta = 5$ %, а сплаву АМцМ — $\sigma_B = 130$ МПа, $\delta = 20$ %.

Малонавантажені деталі зварювальних і клепаних конструкцій, деталі глибокої витяжки виготовляють зі сплавів типу АМцН, а також АМг2М, АМг3М ($\sigma_B = 170...200$ МПа, $\delta = 4...18$ %). Деталі конструкцій середнього навантаження та високої корозійної стійкості виго-

товляють зі сплавів типу АМг5М, АМг6М ($\sigma_B = 280$ МПа, $\delta = 15$ %). Зі сплавів АМц і АМг виготовляють лист, прутки, дріт.

Термічно зміцнювані сплави алюмінію за хімічним складом і властивостями більш різноманітні. Їх поділяють на:

- сплави підвищеної пластичності АВ, АД31, АД33 (на основі системи Al — Mg — Si);
- конструкційні сплави (Al — Cu — Mg) — дюралюміни марок Д1, Д16, Д18, В65;
- ковочні (Al — Mg — Si — Cu) марок АК6, АК8;
- високоміцні (Al — Zn — Mg — Cu) марок В95, В96;
- жароміцні сплави систем (Al — Cu — Mg) марок АК4-1 та (Al — Cu — Mn) Д20.

Сплави підвищеної пластичності — авіалі (АВ, АД31, АД33) — містять у своєму складі, крім алюмінію, 0,4...1,2 % Mg, 0,3...1,2 % Si, 0,15...0,35 % Mn, добре зварюються, корозійно стійкі. Термічна обробка їх складається з гартування від 515...525 °С і старіння (природного або штучного). Штучне старіння проходить значно швидше і здійснюється при 160...170 °С протягом 12...15 год одразу ж після гартування. При цьому виділяється зміцнююча фаза Mg_2Si . Після гартування і штучного старіння властивості сплаву АВ дорівнюють: $\sigma_B = 380$ МПа, $\sigma_T = 250$ МПа, $\delta = 14$ %, а після природного старіння $\sigma_B = 260$ МПа, $\sigma_T = 200$ МПа, $\delta = 20$ %. Зі сплавів АВ, АД3 виготовляють листи, труби, пресовані профілі, заготовки, ковані деталі двигунів, лопасті гвинтів вертольотів тощо.

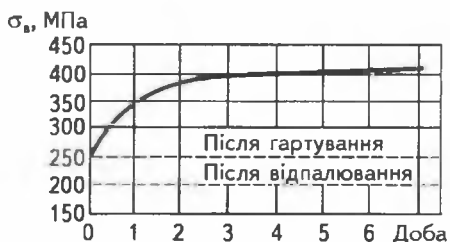
Конструкційні сплави (дюралюміни) широко застосовуються у різних галузях техніки. Їх маркують літерою Д, після якої стоїть цифра, що відповідає умовному номеру сплаву. Термічна обробка дюралюмінів складається з гартування від 500...510 °С (охладженням у киплячій воді) і старіння. Природне старіння здійснюють за кімнатної температури протягом 5...7 діб, штучне — за температур 150...190 °С протягом 4...12 год або при 250 °С протягом 2...4 год. Особливістю гартування дюралюмінів є необхідність додержуватися температурного режиму, наприклад, 505 ± 5 °С (для Д1) і 500 ± 5 °С (для Д16, Д18). Структура дюралюмінів складається з α -твердого розчину і зміцнюючих фаз. Так, у сплаві Д1 основною зміцнюючою фазою є $\theta(CuAl_2)$, у сплаві Д16 з підвищеною кількістю магнію — $\theta(CuAl_2)$ і $S(Al_2CuMg)$. Дюралюмін Д16 має найбільшу міцність після гартування та природного старіння: $\sigma_B = 480$ МПа, $\sigma_T = 320$ МПа,

$\delta = 14 \%$ (рис. 6.1) (лонжерони, шпангоути, обшивки літаків). Деталі і конструкції середньої міцності виготовляють зі сплавів Д1, Д1А ($\sigma_b = 360$ МПа, $\delta = 12 \%$).

Дюралюмініи виробляють у вигляді листа, пресованих і катаних профілів, прутків, труб. Для підвищення корозійної стійкості їх піддають плакуванню. Відповідно при маркуванні таких сплавів додають літеру А, наприклад Д16А, Д1А. Сплави Д18 і В65 є основними алюмінієвими заклепочними сплавами. Найбільш широко дюралюмініи застосовуються в авіаційній промисловості та будівництві.

Рис. 6.1

Зміна міцності дюралюмініу
внаслідок природного старіння



Алюмінієві сплави, придатні для кування (ковочні), позначають літерами АК і відносять до системи $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Mg} - \text{Si}$. Вони пластичні, стійкі до утворення тріщин під час гарячої пластичної деформації. Ці сплави (АК6, АК8) за хімічним складом близькі до дюралюмініїв і відрізняються високим вмістом кремнію (0,7...1,2 %). Сплави АК6 і АК8 застосовують після гартування від $520 \pm 5^\circ\text{C}$ (АК6) і $505 \pm 5^\circ\text{C}$ (АК8) та штучного старіння при $160...170^\circ\text{C}$ протягом 12...15 год. Після термічної обробки механічні властивості цих сплавів такі: $\sigma_b = 400$ МПа, $\delta = 12 \%$ (АК6); $\sigma_b = 480$ МПа, $\delta = 9 \%$ (АК8). Проте обидва сплави мають низьку крозійну стійкість і потребують додаткових заходів щодо захисту від корозії. З них виготовляють штамповані та куті деталі складної форми і середньої міцності (АК6) — підмоторні рами, крепіж, а також такі високонавантажені штамповані деталі (АК8), як пояси лонжеронів, лопасті гвинтів вертольотів, бандажі вагонів.

Високоміцні алюмінієві сплави (В95, В96) окрім міді і магнію містять у своєму складі значну кількість цинку (5...8,6 %). Підвищену міцність цих сплавів зумовлює наявність в їхній структурі після гартування від $460...470^\circ\text{C}$ у воді і штучного старіння при $120...140^\circ\text{C}$ протягом 24...16 год інтерметалічних зміцнюючих фаз відповідно

$\eta(\text{MgZn}_2)$, $\text{T}(\text{Al}_2\text{Mg}_2\text{Zn}_3)$, $\text{S}(\text{Fl}_2\text{CuMg})$. Після термічної обробки механічні властивості для сплаву В95 такі: $\sigma_{\text{в}} = 550 \dots 600$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 530 \dots 550$ МПа, $\delta = 8 \%$; для сплаву В96 $\sigma_{\text{в}} = 700$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 650$ МПа, $\delta = 7 \%$. Сплави В95 і В96 застосовують у літакобудуванні для конструкцій високого навантаження і тривалої експлуатації за температур до 100°C . До недоліків цих матеріалів відносять невисокі пластичність, в'язкість руйнування і низьку корозійну стійкість під напруженням. Підвищенню цих характеристик сприяє двоступінчасте пом'якшуваче старіння.

Жароміцні сплави використовують для експлуатації при температурах до 300°C (поршні, головки циліндрів, диски і лопатки компресорів реактивних двигунів, обшивка надзвукових літаків). Найбільш поширені сплави типу АК4-1 системи $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Mg} - \text{Si}$ з добавками заліза та нікелю; Д20 системи $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Mn}$ з добавками титану та цирконію. У сплаві АК4-1 Fe і Ni утворюють нерозчинну фазу Al_9FeNi , яка під час термічної обробки не змінюється. Основною ж зміцнюючою фазою у сплаві є $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$. Після гартування від $530 \pm 5^\circ\text{C}$ і штучного старіння сплав АК4-1 має такі механічні характеристики: $\sigma_{\text{в}} = 300 \dots 180$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 190 \dots 120$ МПа, $\delta = 18 \dots 12 \%$.

Сплав Д20 має такі характеристики механічних властивостей: $\sigma_{\text{в}} = 420$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 330$ МПа, $\delta = 11 \%$.

Перспективними жароміцними сплавами алюмінію є сплави системи $\text{Al} - \text{Mg} - \text{Li}$, що поєднують високу міцність, низьку питому вагу і достатню жароміцність.

Ливарні сплави алюмінію використовують для виготовлення фасонних виливків різної форми та призначення. До їх складу входять ті самі легуючі компоненти, що й до деформованих сплавів, але у більшій кількості (до $9 \dots 13 \%$ для кожного компонента). Промисловість виробляє ливарні алюмінієві сплави (АЛ) марок від АЛ1 до АЛ33. При маркуванні цих сплавів літера А означає, що сплав алюмінієвий, літера Л — що сплав ливарний, а цифра — порядковий номер сплаву.

За хімічним складом ливарні алюмінієві сплави можна поділити на кілька груп. Наприклад, алюміній з кремнієм (АЛ2, АЛ4, АЛ9) або алюміній з магнієм (АЛ8, АЛ13, АЛ22 та інші).

Типовими є сплави системи $\text{Al} - \text{Si}$ ($10 \dots 13 \%$ Si) — *силуміни*. Розчинність Si в Al мала ($0,8 \%$ при 500°C ; $0,05 \%$ при 20°C). Тому

сплави, які складаються лише з Al і Si, практично не зміцнюються термічною обробкою і в системі Al — Si можуть бути сплави, що частково або повністю складаються з евтектики. Введення в силуміни Cu, Mg сприяє зміцненню сплаву при старінні; Ti, Zr подрібнюють зерно; Mn покращує корозійну стійкість; Ni і Fe підвищують жаростійкість.

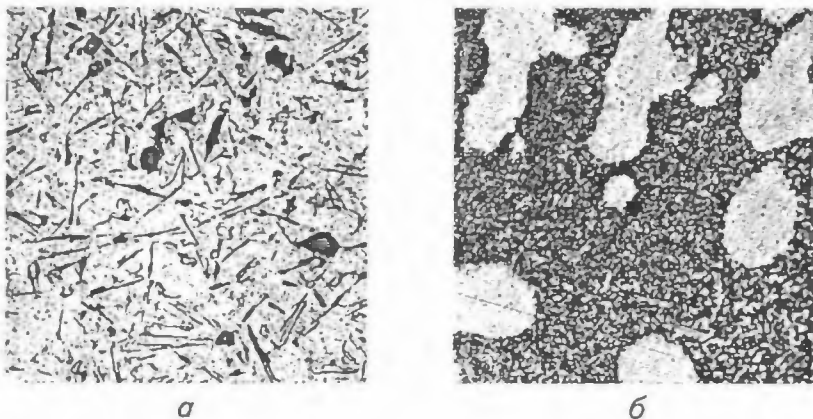


Рис. 6.2

Мікроструктура литого силуміну АЛ2 з 13 % Si:

- a* — немодифікованого (α -твердий розчин та голчасті кристали кремнію, $\times 100$);
б — модифікованого (дендрити α -твердого розчину — світлі і евтектика $\alpha + \text{Si}$ — темна, $\times 300$)

Для поліпшення механічних властивостей силуміни з вмістом кремнію більше 5 % модифікують натрієм: 1...3 % від маси розплаву додають солі натрію ($2/3 \text{ NaF} + 1/3 \text{ NaCl}$). Структура немодифікованих сплавів (рис. 6.2) складається з голчастих кристалів Si і евтектики ($\alpha + \text{Si}$), а після модифікування — з α -розчину і евтектики ($\alpha + \text{Si}$) тонкої будови.

Властивості алюмінієвих ливарних сплавів залежать від способу лиття та виду термічної обробки, швидкості охолодження при твердненні, виливка і під час гартування. Для ливарних сплавів алюмінію характерна більш груба крупнозерниста структура. Це зумовлює режими їх термічної обробки. Тому для гартування силуміни нагрівають до 520...540 °C і витримують 5...10 год для більш повного розчинення включень. Штучне старіння здійснюють при 150...180 °C протягом 10...20 год. З силумінів виготовляють деталі, які працюють

при невеликих (АЛ2), середніх (АЛ4) і вібраційних (АЛ8) навантаженнях, а також при підвищенні до 150... 170 °С температурах (АЛ1, ОВ) тощо.

Спечені алюмінієві порошкові (САП) сплави на основі Al і Al_2O_3 одержують шляхом брикетування порошку алюмінію, вакуумної дегазації брикетів з подальшим їх спіканням під тиском. Вміст Al_2O_3 у спечених сплавах алюмінію знаходиться у межах від 6...9 % (САП1) до 18...22 % (САП4). Дрібні частинки Al_2O_3 гальмують рух дислокацій у сплаві і підвищують його міцність. Жаростійкість САП матеріалів при тривалому нагріванні зберігається до 500 °С, а при короткочасному — до 1000 °С.

§ 6.2

Мідь та сплави на її основі

За обсягами виробництва мідь посідає третє місце після заліза та алюмінію. Запаси її у земній корі дорівнюють 0,01 %, у сульфідних рудах ($CuFeS$ — мідний колчедан, CuS — халькозин, Cu_2S — халькопїрит) — від 0,5 до 5 %. Мідь має ГЦК-кристалічну ґратку, температура плавлення становить 1038 °С, питома вага $\gamma = 8,9$ г/см³.

Одержують мідь із збагаченого концентрату (11...35 % Cu), який спочатку обпалюють при 600...850 °С для часткового зниження вмісту сірки, а потім для відділення від рудних домішок плавлять при 1300...1500 °С на штейн (сплав сульфідів Cu_2S і Fe). Мідний штейн містить 16...60 % Cu, а також Fe і S. Штейн переплавляють у спеціальному конверторі з продувкою розплаву повітрям при 950...1050 °С і одержують чорнову мідь, що містить до 1...2 % домішок (Fe, Zn, Ni, As та інші). Очищують чорнову мідь шляхом вогневого або електролітичного рафінування. Первинна технічно чиста мідь після рафінування містить 99,5...99,99 % Cu. Чиста мідь має 11 марок — М006, М06, М16, М1у, М1, М1р, М1ф, М2р, М3р, М2, М3. Сумарна кількість домішок у марці найвищої чистоти М006 — 0,01 %, а в марці М3 — 0,5 %.

Залежно від механічних властивостей розрізняють також тверду (нагартовану) мідь — МТ і м'яку (відпалену) — ММ. Механічні властивості чистої відпаленої міді такі: $\sigma_B = 220...240$ МПа, 40...80 НВ, $\delta = 45...50$ %, $\psi = 60...75$ %. Цінними властивостями міді є її висока

електро- та теплопровідність, пластичність, низька окислюваність. Електропровідність міді знижується за наявності домішок. Половина всієї міді використовується в електротехніці. Для електротехнічних потреб чисту мідь постачають у вигляді дроту, прутка, стрічки, листа, смуги і труб. У зв'язку з низькою міцністю як конструкційний матеріал використовують не чисту мідь, а лише сплави міді з оловом, цинком, алюмінієм, кремнієм, марганцем тощо. Легування міді підвищує її механічні, технологічні та експлуатаційні властивості. Залежно від хімічного складу розрізняють три основні групи сплавів міді: бронзи, латуні і сплави міді з нікелем.

Бронзи — це сплави міді з оловом, алюмінієм, марганцем, кремнієм, берилієм, свинцем. Залежно від основного легуючого елемента бронзи називають олов'янистими, алюмінієвими, берилієвими та ін. Для підвищення механічних і особливих властивостей бронзи додатково легують Fe, Ni, Ti, Zn, P, для підвищення корозійної стійкості — Mn, пластичності — Ni, міцності — Fe, оброблюваності різанням — Pb.

Маркують бронзи літерами Бр, далі літерами позначають елементи, що входять до складу бронзи: О — олово, Ц — цинк, А — алюміній, С — свинець, Ж — залізо, Мц — марганець, Б — берилій та інші. Після цього цифрами вказують середній вміст елементів у процентах (вміст міді цифрами не вказують). Наприклад, марка БрОЦ4-3 означає, що бронза містить 4 % олова і 3 % цинку, решта — мідь; БрОЦС5-5-5 — бронза містить олова, цинку і свинцю по 5 %, решта — мідь.

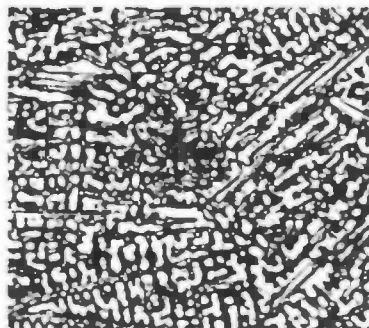
Олов'янисті бронзи (БрОЗ, БрО6, БрОС25-8 та інші), залежно від вмісту олова і фазового стану, поділяють на *однофазні* (до 5 % Sn) із структурою α -твердого розчину і *двофазні* (більше 5 % Sn) із структурою (рис. 6.3), що складається з α -твердого розчину та евтектоїда ($\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$).

Однофазні бронзи пластичні і добре піддаються деформуванню, з них виготовляють фольгу, сітки, дріт, прутки, стрічки тощо у нагартваному (твердому) і відпаленому (м'якому) станах.

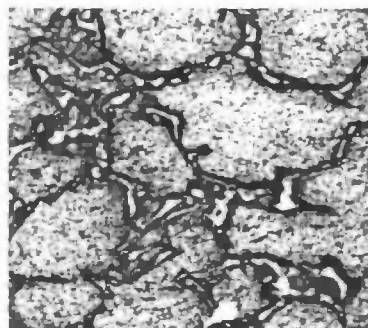
Двофазні олов'янисті бронзи з більшим вмістом олова (до 15...20 %) використовують як ливарні матеріали для виготовлення різних фасонних виливків. Їх також додатково легують цинком (4...10 %), свинцем (3...6 %), фосфором (0,4...1,0 %). Олов'янисті бронзи корозійно стійкі у морській воді, NaOH, Na_2CO_3 , не стійкі у розчинах HNO_3 і HCl, мають досить високі механічні властивості: $\sigma_{\text{в}} = 150...350$ МПа, $\delta = 3...5$ %, твердість 60...90 НВ, добре обробляються різанням.

Олов'янисті бронзи типу БрОЦН3-7-5 використовують для арматури, яка експлуатується на повітрі, у прісній воді, маслі, парі і при температурах до 250 °С; бронза типу БрОЦС5-5-5 — для антифрикційних деталей, арматури тощо.

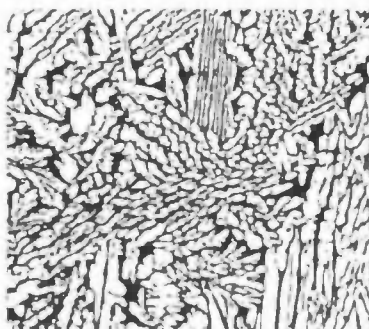
До складу безолов'янистих бронз, окрім міді, входять Al, Fe, Mn, Be, Si, Pb або різні комбінації цих елементів.



а



б



в

Рис. 6.3

Мікроструктура литої бронзи,
× 200:

а — олов'янистої з 5 % Sn;

б — олов'янистої з 10 % Sn;

в — алюмінієвої

Алюмінієві бронзи (4...11 % Al) мають високу корозійну стійкість, високі механічні та технологічні властивості (БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4, БрКМц3-1, БрС30 та інші). Однофазні бронзи (α -твердий розчин) з вмістом алюмінію до 8...9 % добре обробляються тиском у гарячому і холодному стані (рис. 6.3, в). Двофазні бронзи (α -твердий розчин + Cu_2Al) з вмістом алюмінію 9...11 %, а також заліза, нікелю, марганцю мають більшу міцність, піддаються обробці тиском у гарячому стані. Двофазні бронзи можна піддавати зміцнюючій обробці —

гартуванню від 900...950 °С з відпуском за різних температур. При цьому утворюється орієнтована голчаста структура, зростає твердість та міцність, зменшується пластичність. Так, бронза БрАЖН10-4-4 після гартування і відпуску (400 °С) підвищує твердість від 170...200 до 400 НВ. З алюмінієвих бронз виготовляють арматуру трубопроводів для різних середовищ (окрім морської води) і температур до 250 °С (БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л); деталі для експлуатації в середовищі морської води, гвинти, лопасті (БрАМц9-2Л); втулки, підшипники ковзання (БрАМц10-2); фланці, шестерні та інші відповідальні деталі (БрАЖМц10-3-1,5).

Марганцеві бронзи (БрМц5 БрМцС20-5) мають порівняно невисокі механічні властивості, але високу пластичність, корозійну стійкість, жароміцність. З них виготовляють деталі для теплоелектростанцій, котли, вентилі, засувки, арматуру тощо.

Берилієві бронзи містять у своєму складі 2...2,5 % Ве (БрБ2), мають дуже цінний комплекс властивостей: високу хімічну стійкість, теплостійкість, високий поріг пружності, добре обробляються різанням, мають високі механічні властивості ($\sigma_B = 1100...1300$ МПа, твердість 370 НВ, $\delta = 1$ %). Берилієві бронзи гартують у воді за температур не вище 800 °С і піддають штучному старінню при 350 °С.

Використовують берилієву бронзу для виготовлення виробів відповідального призначення: пружні контакти, пружини, мембрани, безіскровий інструмент для ведення вибухонебезпечних гірничих робіт.

Кремнієві бронзи містять у своєму складі 1...3 % Si (БрКН1-3, БрКМц3-1), слугують заміниками олов'янистих бронз (наприклад, БрОЦС6-6-3). Вони мають високі ливарні властивості, корозійну стійкість, пружність, допускають гарячу обробку тиском і обробку різанням. З кремнієвих бронз виготовляють прутки, смугу, виливки, заготовки для виробів, які працюють за температур до 500 °С.

Свинцева бронза (БрС30) широко використовується у машинобудуванні як антифрикційний матеріал.

Латуні — це подвійні або багатокомпонентні сплави міді, у яких основним легуючим елементом є цинк (до 45 %). При більшому вмісті цинку в латуні знижується міцність і зростає крихкість. Вміст інших легуючих елементів у спеціальних латунях не перевищує 7...9 %.

Маркують латуні літерою Л, після якої цифрою вказують вміст міді у процентах (наприклад, сплав Л62 містить 62 % Cu і 38 % Zn). Якщо у складі латуні окрім міді і цинку є ще інші елементи, то для їхнього позначення після літери Л пишуть початкові літери назв цих елементів (О — олово, С — свинець, Ж — залізо, Ф — фосфор). Процент вмісту кожного з цих елементів показують відповідні циф-

ри, які стоять після кількісного показника міді в латуні. Наприклад, сплав ЛАЖ60-1-1 містить 60 % Cu, 1 % Al, 1 % Fe і 38 % Zn.

Залежно від вмісту Zn і структури при кімнатній температурі латуні поділяють (рис. 6.4) на однофазні α -латуні (до 39 % Zn) і двофазні $\alpha + \beta$ -латуні (більше 39 % Zn). Якщо цинку в сплаві більше 39 %, утворюється крихка β -фаза — твердий розчин на основі електронної сполуки типу CuZn з ОЦК-граткою.

Однофазні латуні (Л62, Л68, Л80) пластичні, легко деформуються. Постачають їх у вигляді напівфабрикатів — прутки, дріт, смуга, стрічки тощо. З латуней типу Л62, Л68 виготовляють стрічки, гільзи патронів, радіаторні трубки, дріт, фольгу. Латунь марки Л80 (томпак) має колір золота. Використовують її при виготовленні ювелірних і декоративних виробів, а також для відпо-

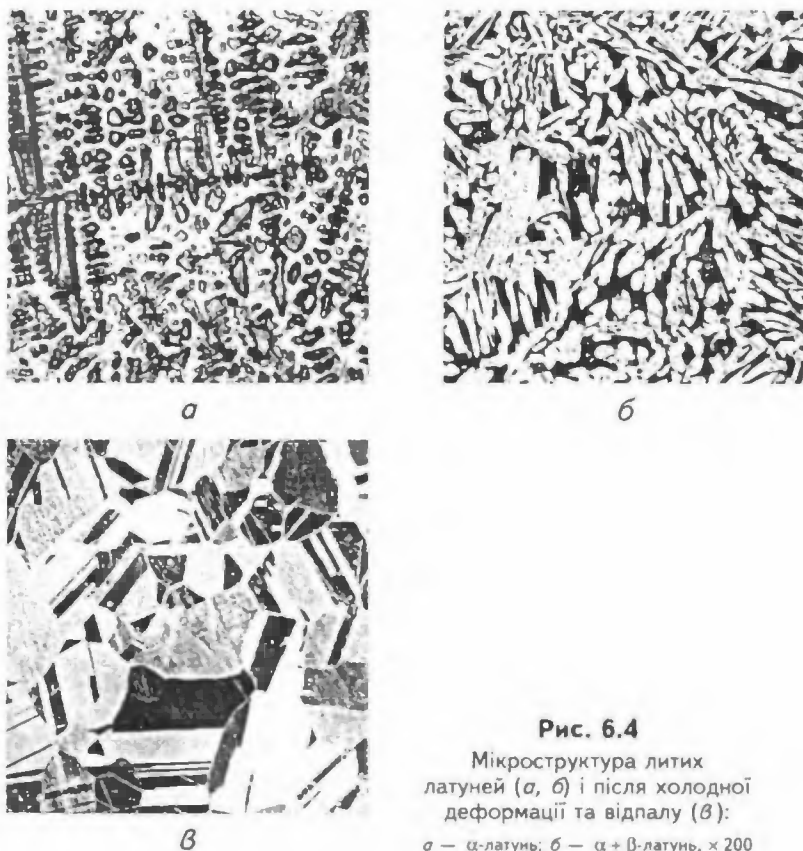


Рис. 6.4

Мікроструктура литих латуней (а, б) і після холодної деформації та відпалу (в):

а — α -латунь; б — $\alpha + \beta$ -латунь, $\times 200$

відальних деталей. Механічні властивості однофазних латуней (Л68, Л80, Л90) такі: $\sigma_B = 260...320$ МПа, $\delta = 45...55$ %, твердість 53...55 НВ.

Двофазні $\alpha + \beta$ -латуні малопластичні, і вироби з них виготовляють в основному методом лиття. З ливарних латуней виробляють арматуру, фасонне лиття, втулки (ЛС59-1Л); антифрикційні деталі (ЛМц58-2-2); корозійностійкі деталі (ЛА67-2,5); гребні гвинти, лопасті, арматуру, що експлуатується до 300 °С (ЛМцЖ55-3-1); черв'ячні гвинти для важких умов праці (ЛАЖМц66-6-3-2).

Механічні властивості таких латуней залежать не лише від їхнього складу, але від умов тверднення у ливарних формах. Так, при литті в кокіль латунь марки ЛС59-1Л має $\sigma_B = 200$ МПа, $\delta = 20$ %, твердість 80 НВ; латунь марки ЛАЖМц66-6-3-2 — відповідно $\sigma_B = 650$ МПа, $\delta = 7$ %, 160 НВ.

Додаткове легування латуней різними елементами підвищує їхні експлуатаційні властивості. Так, легування 1...2 % свинцю поліпшує оброблюваність сплаву різанням (ЛС59 — автоматна латунь); олово підвищує корозійну стійкість у морській воді; алюміній і нікель підвищують механічні властивості (ЛАН59-3-2) тощо.

Сплави міді з нікелем (основний легуючий елемент) використовують як конструкційні та електротехнічні матеріали.

Куналі (Cu — Ni — Al) містять у своєму складі 6...13 % Ni, 1,5...3 % Al, решта — мідь. Такі сплави піддають термічній обробці — гартуванню з наступним старінням. Куналі використовують для виробництва деталей підвищеної міцності, виготовлення пружин, а також різних електромеханічних виробів.

Нейзильбери (Cu — Ni — Zn) містять у своєму складі до 15 % Ni, до 20 % Zn, решта — мідь. Мають колір, близький до срібла, стійкі до атмосферної корозії. Ці сплави використовують у приладобудуванні, виробництві годинників тощо.

Мельхіори (Cu — Ni + невеликі добавки до 1 % Fe і Mn) мають високу корозійну стійкість, зокрема у морській воді. Використовуються для виготовлення теплообмінних апаратів, посуду, декоративних штампованих і карбованих виробів.

Копель (Cu — Ni — Mn) містить у своєму складі 45 % Ni, 0,5 % Mn, решта — мідь. Сплав з високим питомим електроопором використовують в електротехніці, а також для виготовлення електронагрівальних елементів.

Манганін (Cu — Ni — Mn) — МНМц3-12 відносять до реостатних сплавів, використовують в електротехніці. Таке саме застосування має і константан.

Константан (Cu — Ni — Mn) — 40...43 % Ni, 0,5...1,5 % Mn, решта — мідь (МНМц40-1,5).

§ 6.3

Титан, магній та їх сплави

Титан — сріблясто-сірий метал з температурою плавлення 1672 °С, з малою питомою вагою ($\gamma = 4,5 \text{ г/см}^3$) і високою корозійною стійкістю належить до перехідних металів четвертої групи періодичної системи елементів. Міцність титану $\sigma_B \approx 270 \text{ МПа}$, пластичність $\delta \approx 25 \%$, твердість 100...140 НВ. Міцність технічно чистого титану залежить від чистоти металу. Домішки вуглецю, кисню, водню знижують його пластичність, опір корозії і зварюваність. Особливо шкідливими є домішки водню. Механічні властивості технічно чистого титану (марки ВТ1-0, ВТ1-00, ВТ1-1) знаходяться на рівні властивостей звичайних конструкційних сталей. З нього виготовляють катані і пресовані труби, лист, дріт, поковки. Він добре зварюється, має високі механічні характеристики, корозійну стійкість і жароміцність, але важко обробляється різанням, має низькі антифрикційні властивості.

Легування титану певними елементами дозволяє значно підвищити його механічні ($\sigma_B \geq 1500 \text{ МПа}$, $\delta = 10...15 \%$) та спеціальні властивості. Так, Al підвищує жароміцність і механічні властивості титану, V, Mo, Cr, Mn — жароміцність.

Титан є поліморфним металом і існує у двох алотропічних модифікаціях — α і β . Температура поліморфного перетворення дорівнює 882,5 °С. Нижче цієї температури титан має гексагональну кристалічну ґратку, а вище — ґратку об'ємноцентрованого куба. Легуючі елементи, які входять до складу промислових титанових сплавів, утворюючи з титаном тверді розчини заміщення, змінюють температуру поліморфного перетворення $\alpha \rightleftharpoons \beta$. Такі елементи, як Al, O, N підвищують температуру перетворення, розширюють область існування α -твердого розчину на діаграмі стану (α -стабілізатори); елементи Mo, V, Nb, Cr, Mn, Fe знижують температуру $\alpha \rightleftharpoons \beta$ перетворення (β -стабілізатори). Крім α - і β -стабілізаторів, розрізняють також нейтральні зміцнювачі Sn, Zr, Hf, які помітно не впливають на температуру перетворення.

Залежно від структури у рівноважному стані титанові сплави поділяють на α -сплави (однофазні) і β -сплави (двофазні). Так, основними промисловими сплавами титану зі структурою $\alpha + \beta$ є ВТ5 (4,5...5 % Al; 3,5...4,5 % V), ВТ8 (5,8...6,8 % Al; 2,8...3,8 % Mo). За технологічним призначенням їх поділяють на ливарні і такі, що піддаються деформуванню.

За міцністю титанові сплави поділяють на три групи:

- низької міцності з $\sigma_b = 300...700$ МПа (BT1);
- середньої — з $\sigma_b = 700...1000$ МПа (BT3, BT4, BT5);
- високої міцності з $\sigma_b > 1000$ МПа (BT6, BT14, BT15) після гартування та старіння.

Титанові сплави можна піддавати всім основним видам термічної обробки, а також хіміко-термічній обробці, змінюючи їхні властивості у потрібному напрямку.

Наприклад, механічні властивості сплаву BT5 після відпалювання при 750°C становлять: $\sigma_b = 750...900$ МПа, $\delta = 10...15\%$, твердість 240...300 НВ. Сплав BT8 після гартування від 900°C і старіння при 500°C має міцність $\sigma_b = 1000...1150$ МПа, пластичність $\delta = 3...6\%$, твердість 310...350 НВ, а сплав BT14 відповідно $\sigma_b = 1150...1400$ МПа, $\delta = 6...10\%$, твердість 340...370 НВ.

Ливарні сплави мають більш низькі механічні властивості порівняно з аналогічними деформованими. Для лиття використовують сплави, що відповідають хімічному складові сплавів BT5, BT14, маркують їх з доданням літери Л (BT5Л, BT14Л), або спеціальні ливарні сплави.

Титан та його сплави використовують в авіації та ракетобудуванні, хімічній промисловості, суднобудуванні і криогенній техніці.

Магній — найбільш легкий з кольорових технічних металів — ($\gamma = 1,75$ г/см³), не має алотропічних перетворень. Температура плавлення магнію 650°C . Технічно чистий магній має низькі механічні властивості ($\sigma_b = 180$ МПа, $\delta = 5\%$, твердість 30 НВ), схильний до самозапалювання, тепло- та електропровідність його низькі. Використовується в техніці у вигляді сплавів. До складу магнієвих сплавів входять Al, Zn, Mn, Zr. При цьому міцність зростає до 200...450 МПа. Сплави магнію поділяють на: • деформівні; • ливарні.

Деформівні магнієві сплави призначені для виготовлення напівфабрикатів (пруток, лист, профіль) обробкою тиском. За нормальних температур магній деформується погано. Для підвищення пластичності його сплавів застосовують обробку тиском при $360...520^\circ\text{C}$ залежно від марки сплаву. Такі сплави маркують літерами МА і цифрами (МА1, МА2-1, МА14), які означають порядковий номер сплаву.

Сплав МА1 (містить 1,3...2,5 % Mn) має хорошу технологічну пластичність, зварюваність і корозійну стійкість. Відноситься до сплавів низької міцності. Додаткове легування його цезієм, при-

близно 0,2 % (МА8), подрібнює зерно, підвищує механічні властивості та здатність до холодної деформації. Сплав МА2-1 належить до системи $Mg - Al - Zn$, має досить високі механічні властивості і технологічну пластичність. Піддається всім видам листового штампування та прокатування. З деформованих магнієвих сплавів (МА) виготовляють деталі літаків, автомобілів і прядильних верстатів.

Ливарні магнієві сплави використовують для виготовлення деталей методом лиття. Їх маркують літерами МЛ і цифрами, що означають порядковий номер сплаву (МЛ5, МЛ6, МЛ-10, МЛ-12). Наприклад, сплави МЛ5 і МЛ6 належать до системи $Mg - Al - Zn$. Найпоширенішим з цієї групи сплавів є МЛ5 (7,5...9 % Al; 0,2...0,8 % Zn; 0,15...0,5 % Mn). Виливки з магнієвих сплавів іноді піддають гартуванню з наступним старінням. Деякі сплави МЛ застосовують для високонавантажених деталей авіаційної промисловості (картери, корпуси приладів, форми шасі тощо). З огляду на низьку корозійну стійкість магнієвих сплавів вироби з них піддають окисдуванню з наступним нанесенням на них лакофарбових покриттів.

Контрольні запитання

1. Які кольорові метали і сплави застосовують у машинобудуванні?
2. Назвіть основні сплави алюмінію, їх властивості, застосування.
3. Що таке дюралюміній?
4. Які сплави алюмінію використовують у ливарному виробництві?
5. Назвіть основні сплави на основі міді.
6. Що таке латунь, її властивості і застосування?
7. Що таке бронза, її властивості і застосування?
8. Яка система маркування бронз і латуней?
9. Які сплави міді з нікелем використовують як конструкційні і електротехнічні матеріали?
10. Які властивості сплавів титану та де вони застосовуються?
11. Як поділяють сплави титану залежно від структури у рівноважному стані?
12. Назвіть області застосування деформованих і ливарних сплавів магнію.

Порошкові та неметалеві матеріали



Глава 7

Порошкова металургія

Порошкова металургія — це галузь техніки, а не металургії. За своєю сутністю порошкова металургія охоплює сукупність методів виробництва порошків металів, металоз'єднань та виробів з порошків або їхніх з'єднань (у тому числі і з неметалічними матеріалами — порошками) без розплаву основного компонента (але інші компоненти можуть бути і рідкими). Тобто порошкова металургія не лише виробляє порошок, кінцева ціль її — напівфабрикати та вироби.

Порошкова металургія була відома з сивої давнини. Так, приблизно 5 тис. років тому вже одержували залізо в твердому вигляді без плавлення руди, відновлюючи її деревним вуглецем при горінні вогнищ. Проте після того як люди навчилися плавити метал, металовиробнича порошкова металургія була забута і відновилась лише в 1826 р. у Росії завдяки зусиллям П. Г. Соболевського та В. В. Любарського. У тому ж році методом порошкової металургії з природних розсипищ платини ($T_{\text{пл}} = 1777^\circ\text{C}$) одержали вироби, які були продемонстровані на засіданні Санкт-Петербурзької Академії наук. Через три роки аналогічним методом, тобто послідовним чергуванням нагріву та обтиснення, платину одержав Волостан (Англія).

З кінця XIX ст. перед світовою наукою та технікою серйозно постала проблема тугоплавких металів з температурою плавлення вище 3000°C ($T_{\text{пл. w}} = 3800^\circ\text{C}$). Згодом виникла ще й проблема стосовно матеріалів, які б могли обробляти ці метали. В зв'язку з необхідністю вирішення цих проблем і одержав новий імпульс розвитку метод порошкової металургії.

Проте помітний черговий рубіж у розвитку цього напрямку можна віднести приблизно до 1950 р., коли в усьому світі методом порошкової металургії виробили близько 30 тис. т порошків і виробів. До 1982 р. виробили вже приблизно 1 млн 200 тис. т матеріалу та 600 тис. т виробів. У 1985 р. в усьому світі виробляли більше 1,5 млн т порошку, з яких тільки частка США становила більше 500 тис. т. У Радянському

Союзи до 1990 р. виробництво порошку та виробів досягло 200 тис. т, з яких значна частина була вироблена в Україні. До 2000 р. на пострадянському просторі в розвитку цієї галузі намітився спад і зараз в Україні продукція порошкової металургії становить 20...25 тис. т за рік. У цілому ж у світі приріст у галузі порошкової металургії продовжує збільшуватись і вже перевищує 15 % за рік, що значно вище за інші галузі промисловості.

Використання виробів порошкової металургії в різноманітних галузях промисловості, науки і техніки, особливо космонавтики та авіації, зумовлено насамперед тим, що порошкова металургія фактично комплексно вирішує потрійну задачу, а саме:

- виробництво спечених матеріалів і виробів з високими й унікальними фізичними та механічними властивостями, котрі не можуть бути одержані іншими методами;
- виробництво деталей і виробів, властивості яких аналогічні тим, що одержані за інших методів, але завдяки методу порошкової металургії виробництво їх більш економічне;
- виробництво спечених матеріалів і виробів з них з тонкодисперсною структурою, формування якої забезпечує різке зростання властивостей матеріалів.

Це переконливо демонструється на прикладі спеченого композита вольфрам — мідь. Процес спікання відбувається при температурі 1000 °С, при якій розплавляється лише мідь. Такий композит може недовгий час працювати при температурі, що перевищує температуру плавлення вольфраму, оскільки в процесі експлуатації мідь випотіває і, випаровуючись, забирає тепло, а вольфрам якийсь час зберігає несучу здатність.

Економічність порошкової металургії пов'язана насамперед з економією металу (коефіцієнт використання металу (КВМ) при литті та прокатці може бути менше за 0,6, а для порошкової металургії він завжди більше 0,9). Крім того, виріб з порошку завжди шпаристий, що також дає економію металу, оскільки вага порошкової конструкції менша за суцільну і має таку саму несучу здатність.

Дисперсність в структурі порошкового матеріалу, коли розмір частинок менше за 0,2 мкм, забезпечує збільшення межі міцності та текучості порівняно з суцільними матеріалами в декілька разів.

На жаль, порошкова металургія має деякі специфічні недоліки, що стримує її розповсюдження та використання. Так, окремі порошки мають високу вартість, деталі малотоннажні, є обмеження в технологічних процесах виготовлення деталей за формами, розмірами тощо.

Основні етапи одержання виробів методом порошкової металургії:

- виробництво порошків;
- формування заготовок;
- нагрів (спікання) заготовок;
- додаткова обробка спечених виробів.

§ 7.1

Основні технології виробництва порошків

При виробництві порошків розрізняють дві групи методів: механічні (що не викликають суттєвих змін за хімічним складом) та фізико-хімічні (які здатні до суттєвих фізико-хімічних перетворень).

До *механічних* методів відносять: операції перевodu твердого матеріалу у порошок (різання, дроблення, розмелення, диспергування ультразвуком) та операції перевodu рідкого матеріалу в порошок (розпилення шляхом подрібнення розплавів механічно, відцентровими силами, або енергоносієм; сюди відносять і грануляцію).

До *фізико-хімічних* відносять: методи відновлення хімічних сполук (технологія залежить від типу відновлювача та перебігу процесу), електроліз металів (у водних або у сольових розчинах), термічний розклад хімічних сполук (наприклад, термічна дисоціація), міжкристалеву корозію, термодифузне насичення, сублімацію та конденсацію (останню широко використовують при одержанні порошків Zn та Cd).

Проте найчастіше використовують комбіновані методи.

При одержанні порошку із магнієвого литого матеріалу часто використовують різання шляхом фрезерування. Подрібнення здійснюють за допомогою спеціальних дробарок, які забезпечують ступінь подрібнення від 3 до 6. Зазвичай подрібнення є підготовчою операцією. Розмел виконують у млинах різноманітних конструкцій, ступінь подрібнення в яких від 50 до 100. Найчастіше розмел здійснюють у кульових обертаючих млинах. Тіло, що розмелює, не обов'язково має бути кулькою, але лінійні розміри його повинні бути сумірні.

Для рівноваги кульки на стінці барабана в zenіті число обертів має досягати критичного значення $n_{кр} = 42,2/\sqrt{D}$, об/хв, де D — діаметр

барабана, м. Якщо $n < n_{кр}$, то кулька зірветься, а якщо $n > n_{кр}$, то залишиться.

У режимі ковзання шарове навантаження ніби проковзує при $n_c \leq 0,2 n_{кр}$. У режимі перекочування при $n_n \leq 0,4...0,6 n_{кр}$ кульки починають рухатися, при цьому вся сумарна поверхня їх працює.

У режимі інтенсивного подрібнення при $n_{подр} \approx 0,75...0,85 n_{кр}$, коли кулька починає зриватися, до стирання додається ще й удар.

У режимі $n \approx n_{кр}$ подрібнення різко знижується і за своїм ефектом стає близьким до режиму ковзання.

Розглянуті режими є оптимальними для коефіцієнтів заповнення млина $\varphi = 0,4...0,5$. Маса сталевих кульок має бути в межах 1,7...1,9 кг на 1 л млина (для твердосплавних кульок значення інші).

Важливе значення мають також габаритні розміри барабана. У млині Круппа для $D/l \geq 3...5$, де l — довжина барабана, посилюється подрібнююча дія.

Розмір куль також впливає на інтенсивність розмелу. Максимальний діаметр куль $d_{max} \approx (1/18...1/24)D$, де D — внутрішній діаметр барабана. Для твердосплавних куль $d_{min} \approx 4$ мм.

Маса куль зазвичай має бути в 2...3 рази більша за масу матеріалу, що подрібнюють, а при інтенсивному подрібненні — в 5...10 разів більше.

Важливим є також час подрібнення, тому бажано знати оптимум цього часу. Реально він становить години або десятки годин, але зазвичай не більше 100 год.

У кульових млинах одержують порошок у вигляді частинок неправильної форми розміром 0,1...3,0 мм. За наявності рідини (за рахунок зменшення тертя) частинки більш рухомі, а за рахунок електростатичних зарядів відбувається більш інтенсивне подрібнення. Проте при цьому є і незручності — порошок треба висушувати. Добра рідина — це вода, але застосовують її рідко через необхідність вакуумної сушки. В зв'язку з цим найчастіше використовують спиртові середовища (наприклад, 96 %-й етиловий спирт).

В останні 20—30 років для розмелу широко застосовують планетарні млини, або планетарно-відцентрові млини (ПВМ), у яких вал обертається в одному напрямі, а барабани — в іншому. Недоліком цих млинів є більш інтенсивне забруднення матеріалу.

У вібраційних млинах вібрає корпус апарата, але в них коефіцієнт заповнення $\varphi \approx 0,8$. Основними перевагами цих млинів є те, що їхня

продуктивність вища, а забрудненість порошку нижча. Частота коливань барабана в таких млинах досягає 3000 за хвилину, а амплітуда коливань становить 2...3 мм.

Застосовують також вихрові млини з двома пропелерами, що обертаються в різних напрямках, та струминні млини, в яких відбувається самоподрібнення. У вихрових млинах оберти лопастей можуть досягати 3000 об/хв, а частинки порошку подрібнюються до 50...2000 мкм.

Коли рідкий матеріал перетворюється на порошок, відбуваються фізико-хімічні процеси. Справа в тому, що при будь-яких процесах розпилення рідкого матеріалу швидкість охолодження дуже висока — до 10^8 град/хв. При цьому тверде тіло (порошок) має аморфну, а не кристалічну структуру. При розпиленні енергоносієм — газом — необхідно, щоб швидкість його була не менша 100 м/хв. У США ще на початку 80-х років XX ст. знаменита установка “Торнадо” забезпечувала швидкість газу до 1000 м/с, тобто дорівнювала трьом швидкостям звуку.

Якщо повітря використовують як енергоносіє, то склад його достатньо часто модифікують. Так, при одержанні спеченого алюмінієвого порошку (САП) повітря розбавляють за киснем у три рази, щоб навколо частинок порошку створювалась оксидна плівка, але не було займання порошку алюмінію, який використовують як тверде паливо.

При розпиленні водою необхідно використовувати високий тиск. Зараз є установки, в яких тиск вище 20 МПа (~ 200 атм). Вважають, що при водяному розпиленні порошок окислюється менше.

Форма частинок при розпиленні енергоносієм має бути сферичною, але для надання частинкам такої форми потрібен час, а його часто бракує. В промислових установках в основному одержують сферичний порошок з розміром частинок 0,05...0,35 мм. Частинки іншої форми одержують для надання кінцевому продукту унікальних та специфічних властивостей.

Для розбризкування розплавленого металу застосовують й інші методи. В одному з них два валка, що виготовляють із матеріалів, теплопровідність яких низька (наприклад, з нітриду бору), обертаються навколо горизонтальних осей назустріч один одному з числом обертів (n) до 4 тис. за 1 хвилину. Зі спеціальної ємкості зверху в міжвалковий простір надходить рідкий метал, а з зазору між валками, що обертаються, вниз вилітають краплі розплаву, які під час падіння перетворюються в порошок і висипаються в збірний пристрій. У другому методі над ємкістю з рідким металом обертається мідний диск ($n = 4$ тис. об/хв) і дотискується до розплаву, плівка якого твердне

на приторцевій поверхні диска й у вигляді краплеподібних гранул порошку під дією відцентрових сил викидається в забірний пристрій. Замість гладкого іноді використовують диск з лопатками. В цьому випадку при формуванні порошку використовується енергія удару лопаток об поверхневий шар розплавленого металу. Одержані за цими методами частинки порошку також мають розмір 0,05... 0,35 мм.

Для розпилення порошків з твердого матеріалу використовують також методи з електродами, які обертаються і вібрують. Число обертів або коливань електродів може досягати 20 тис. за хвилину. Ці методи складні за конструкцією через необхідність вакуумування установки та додержання постійного розміру дуги.

Фізико-хімічні методи використовують тоді, коли початковий матеріал знаходиться у вигляді хімічної сполуки. Виробництво порошків із таких сполук, зазвичай, супроводжується зміною хімічного складу сировини або його агрегатного стану.

Одержання металічних порошків хімічним відновленням оксидів металів (Fe, Cu, Ni, Co, W, Mo) — поширений, високопродуктивний та економічний метод. Як відновлювач використовують твердий вуглець (C), газоподібний водень (H_2) чи оксид вуглецю (CO). Сутність цього методу можна пояснити на класичних прикладах одержання порошку заліза. В першому випадку дрібнозернисту руду (або концентрат) розмішують на решітці, крізь яку подають водень чи інший відновлювач, наприклад CO, під тиском 15 МПа (близько 15 атм). У шарі, що утворюється (який називають *киплячим*), забезпечується інтенсивний контакт газу — відновлювача з частинами оксиду заліза. Для відновлення 1 т залізного порошку витрачається до 650 м³ водню.

В другому випадку губчасте залізо одержують в карбідокремнієвих капсулах, які являють собою чергування декількох шарів відновлювача (подрібнене тверде паливо та вапняк) і відновлювальної, роздробленої на малі частинки, руди. Такі капсули нагрівають, витримують при 1200 °C в тунельних печах і охолоджують (до 100 год) доти, поки не завершиться процес відновлення заліза. Відновлене губчасте залізо має вигляд товстостінних труб, які чистять та подрібнюють. Одержаний у такий спосіб порошок може мати чистоту до 99 % Fe і 0,1 % C.

Методами електролітичного осадження (електроліз) водних розчинів солей одержують порошки Sn, Ag, Cu, Fe та інші, а безпосередньо електролізом розплавів — порошки Ti, Ta, Zr, Fe тощо.

У водних розчинах температура звичайно не перевищує 50 °C. Будова електролізерів проста. В розплавах температура досягає 700...750 °C і тому для збереження солей від окислення необхідна

герметизація електролізерів. При електролізі розплавів з “брудної” сировини, наприклад солей Fe або Ti, одержують чисті метали. Частинки цих металів у твердому стані безкисневі при виділенні їх на катоді (мінус на електроді), а гази, що виділяються на аноді (плюс на електроді), зазвичай фтор та хлор, стравлюються. При застосуванні цього методу іноді можливий від’ємний анодний ефект, коли газ біля анода віджимає розплав і в електролізері починається іскріння.

Розглянемо процес електролізу на прикладі одержання танталового порошку. Для цього в електролізер завантажують KCl (43...55 %), KF (42...27,5 %) та K_2TaF_7 (10...17,5 %). Остання сполука забезпечує електропровідність. Проте процес електролізу відбувається лише тоді, коли додають п’ятиокис танталу Ta_2O_5 (2,5...7,0 %), який покращує змочуваність та зменшує іскріння. Анод зазвичай графітовий; катодом є тигель, в якому знаходиться розплав. При нарощенні осаду Ta в тиглі графітовий анод піднімають і через стінки підкидають Ta_2O_5 . Після завершення процесу електроліт зберігають (шляхом його виплавляння з тигля) і в подальшому використовують знову. Танталовий осад має вигляд губки, шляхом дроблення (толчення) з нього одержують порошок. У такий самий спосіб, особливо при переробці відходів, одержують порошки інших металів.

Методом термічного розкладення карбонільних сполук типу $Me(CO)_c$ (де Me — один із металів) одержують також чисті металічні порошки.

Карбоніли — це адсорбційні сполуки, які утворюються не за хімічними законами валентності. Температури плавлення карбонілів низькі. Слід відзначити такі їхні властивості, як токсичність, летучість, здатність розкладатися з вибухом при дії світла.

Загальний вигляд реакції синтезу (створення) карбонілу і його термічної дисоціації (розкладання) можна записати у вигляді



де B — деякий баласт.

Реакція синтезу — створення $Me_a(CO)_c$ — можлива лише за наявності CO та високих тисків порядку 5...30 МПа (50...300 атм). Створювані при 100...200 °C карбоніли легко сконденсують у холодильнику. В результаті термічної дисоціації ці карбоніли при 50...300 °C легко розкладаються, виділяючи метал, і повертають у процес CO. За таким методом одержують карбонілоутворювальні метали: Cr, Ni, Fe, Co, платиноїди тощо. Порошки Fe, Ni, Co зазвичай одержують з карбонілів типу $Fe(CO)_4$, $Fe(CO)_5$, $Ni(CO)_4$, $Co(CO)_3$.

За однією з методик при одержанні Fe газовий потік карбонілу проходить по вертикальній трубі, на дні якої і збирається порошок. Частинки заліза у трубі завдовжки 3 м долають відстань до декількох кілометрів, при цьому вони зростають з формуванням шаруватої структури. В структурі частинок заліза може бути від 7 до 9 прошарувань, формування яких пов'язано з вторинними реакціями.

У Ni прошарковій структури не формуються.

Крім монокарбонільних порошків чистого металу можна одержувати і полікарбонільні.

Поділка чистого карбонільного порошку дуже висока (приблизно на порядок вище за поділки звичайного порошку), що пов'язано, зокрема, і з необхідністю відпалу полуфабриката у водні.

При одержанні порошків деяких рідкісних металів застосовують метод гідрогенізації, заснований на використанні явища окрихчення воднем. Метод може застосовуватися до тих металів, які при 300...800 °С активно поглинають водень і випадають в осад на дні реакторів у вигляді крихкої металічної губки. Подалі таку губку розмелюють і піддають дегідрогенізації (зневоднюють) у вакуумі при 800 °С. Одержані за такою технологією порошки мають, як правило, дуже низьку пластичність.

§ 7.2

Властивості порошків

У порошкоподібних матеріалів звичайно враховують три групи властивостей:

- хімічні;
- фізичні;
- технологічні.

Хімічні властивості — це газонасиченість, пірофорність (здатність до займання) та токсичність.

Фізичні властивості — це розміри (частинки за розмірами відрізняються на чотири порядки від часток мікрметра до 1 мм), форма, питома вага (яка не відповідає табличній щільності для компактного матеріалу), питома поверхня та мікротвердість.

Технологічні властивості — це насипна щільність (міра заповнення порошком у стані засипки), текучість (здатність витікати з отво-

ру), пресовність, формовність (властивість зберігати форму), відсутність опору на розтяг, здатність передачі навантаження в усі сторони (подібно рідині).

Коротко про хімічні властивості. Зміст основного компонента в порошках, як правило, не менше 98 %, інші — домішки. Газові домішки специфічні для порошку і наявні в ньому завжди. Для 10 мкм порошку гарантується, як мінімум, 0,5 % газу, для 1 мкм порошку адсорбційного газу може бути до 5 % і так далі.

Пірофорність оцінюється по температурі займистості та нижній концентраційній межі вибуховості (НКМВ) у грамах на кубічний метр (г/м^3). Звичайно займання порошку можливе при 300...320 °С, а в цирконію (Zr) крупного воно відбувається приблизно при 180 °С, а у Zr дрібного (6 мкм) при 20 °С. Такий порошок зберігають у дистильованій воді. Для Al НКМВ $\approx 10 \text{ г/м}^3$, для Fe НКМВ $\approx 105 \text{ г/м}^3$.

Щодо токсичності, то слід пам'ятати, що всі порошки токсичні та шкідливі через їхнє накопичення в організмі та труднощі з їх виведенням. Токсичність оцінюють за значенням межі допустимої концентрації (МДК) у міліграмах на кубічний метр (мг/м^3). Порошки берилію (Be) та оксиди ванадію (V_2O_5) дуже токсичні, — їхня (МДК) становить частки мг/м^3 , для оксиду ванадію МДК $\approx 0,1 \text{ мг/м}^3$.

Фізичні властивості. Форма частинок звичайно пов'язана з методом одержання порошку. Частинки порошку заліза мають п'ять-шість форм: • округла, сферична правильна форма — для карбонільного методу; • губчаста форма — при розпиленні; • дендритна форма — при електролізі; • осколочна форма — при застосуванні методів механічного подрібнення; • тарільчата форма — при вихровому подрібненні.

Розмір частинок, як зазначалось, коливається від 0,1...0,2 мкм до 1 мм. Оцінюють набір частинок за вузьким розмірним діапазоном, тобто за так званим гранулометричним складом. Для цього використовують такі методи: ситовий (гратчастий) аналіз за допомогою бронзових та латунних сіток дозволяє оцінювати мінімальний розмір частинок до 40 мкм; мікроскопічний оптичний аналіз — від 2 до 100 мкм, а електронний — менше 1 мкм. Застосовують також седиментаційний аналіз, пов'язаний з оцінкою властивості осаджування частинок залежно від швидкості, та кондуктометричний, заснований на оцінці провідності рідини, в яку потрапляють тверді частинки.

Питома поверхня оцінюється поверхнею всіх частинок, що складають одиницю маси, зазвичай це 1 г. За цим параметром порошки суттєво відрізняються від компактних матеріалів і можуть мати зна-

чення до 5 м^2 на 1 г. Площа поверхні вимірюється за допомогою оцінки кількості адсорбованого мономолекулярного шару азоту N_2 , одна молекула якого займає $16,2$ квадратних ангстрема ($1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ мм}$).

Пікнометричну щільність порошку знаходять за формулою

$$\gamma = \frac{P_2 - P_1}{V - \frac{P_3 - P_2}{\gamma_p}},$$

де V — тарировочна ємність рідинного пікнометра;

P_1 — маса сухого пікнометра;

P_2 — маса пікнометра з порошком;

P_3 — маса рідинного пікнометра з порошком;

γ_p — щільність рідини.

Як пікнометричну рідину дуже часто застосовують гас, який має малу молекулу й активну проникну здатність.

Для виміру щільності застосовують також, наприклад у Франції, і газові пікнометри.

Мікротвердість визначають за допомогою різного типу мікротвердомірів на мікрошліфах частинок, але готувати такі мікрошліфи, наносити на них, а потім і вимірювати відбитки вельми складно.

Технологічні властивості. Насамперед це насипна (відносна) щільність, під якою розуміють масу одиниці об'єму вільного насипного порошку в грамах на кубічний сантиметр (г/см^3). Тобто фактично це концентрація порошку, щільність якого завжди менша за щільність компактного матеріалу. Насипка для такої оцінки повинна виконуватися з нульовою швидкістю. Іноді оцінюють не щільність, а насипний об'єм у кубічних сантиметрах на грам ($\text{см}^3/\text{г}$).

Текучість — це здатність порошку витікати із отвору. Текучість вважається нормальною, якщо навіска (порція) порошку масою 50 г витікає з отвору діаметром $2,5 \text{ мм}$ за 20 с .

Пресовність — це здатність порошку ущільнюватись під дією зовнішнього тиску.

Формовність — це здатність порошку зберігати форму після зняття навантаження.

§ 7.3

Виробництво матеріалів та виробів з порошків

При виробництві матеріалів, напівфабрикатів (брикетів) та виробів із металічних порошків або їхніх сумішей з неметалами у порошкову масу в деяких випадках додають різні технологічні наповнювачі, наприклад, розчин каучуку в бензині, парафін, віск, спирт, бензол та інші. Такі наповнювачі сприяють оптимізації процесів формування, пресування та прокатці порошкової маси.

На завершальній стадії технології порошкової металургії відбувається також процес спікання.

Технологія ливарної формовки, пресування та прокатки детально описана у розділі 4, гл. 9, 10.

У рамках технології порошкової металургії коротко розглядаються основні процеси надання специфічному порошкоподібному матеріалу певної форми, розмірів, щільності та міцності, необхідних для подальших операцій виготовлення деталей.

Найбільше поширена технологія холодного пресування на пресах різних систем. Одностороннє пресування з одним пуансоном застосовують для виготовлення невисоких виробів простої конфігурації. При цьому щільність по перерізу деталі нерівномірна. Двостороннє пресування (з двома пуансонами, що рухаються назустріч одне одному) дає більш рівномірний розподіл щільності за перерізом виробів і дозволяє одержувати деталі з відношенням висоти до діаметру більшим двох. Тиск при холодному пресуванні знаходиться в межах 200...1000 МПа.

Вироби з більшим відношенням довжини до діаметра (прутки, труби, полоси) одержують методом мундштучного пресування. В цьому випадку матеріал, зазвичай, пластифікують парафіном. Швидкість витікання пластифікованого порошку досягає 10 мм/с. Щільність по перерізу деталі рівномірна. За цим способом можна виготовляти вироби не тільки простого, але й складного профілю.

Гідростатичне пресування застосовують для масивних виробів (до 100 кг). У цьому випадку металічний порошок вміщують в еластичну (резинову, металічну) оболонку і піддають всесторонньому обжиму рідиною в гідрокамерах високого тиску (до 3000 МПа). За цим методом можна одержувати вироби з непластичних матеріалів. За такого пресування деталі мають рівномірну щільність, але часто потребують додаткової механічної обробки.

Вельми перспективне застосування технології прокатки порошків. За цим методом одержують одно- та багат шарові пористі та компактні стрічки, смуги і листи завтовшки від 20 мкм до 3 мм із заліза, нікелю, нержавіючої сталі, титану та інших металів, а також із суміші порошків складних сполук. Швидкість прокатки металічних порошків завжди менша за швидкість прокатки литих металів. Величина її обмежується сипучістю порошку, тобто лінійна швидкість поверхні валків повинна бути меншою за швидкість переміщення порошку з бункера в зазор між валками.

Поряд з холодним застосовується також і гаряче пресування, тобто суміщення операцій пресування напівфабрикатів і їх спікання. Деталі, одержані гарячим пресуванням, мають високу міцність і щільність. За цим методом в основному виготовляють деталі типу тонких пластин та дисків твердих сплавів і спеціальних вогнетривких матеріалів. При температурах гарячого пресування $0,6...0,9 T_{пл}$ ефективно реалізується пластичність матеріалу. Нагрів же до таких температур часто виконують струмом високої частоти. Але тут виникає проблема для прес-форм, оскільки міцність графітових форм не перевищує 50 МПа.

Спікання, як самостійна операція, — це процес термообробки напівфабрикатів при температурі $0,4...0,9 T_{пл}$ основного металу багатокomпонентної суміші протягом 1...2 год. При спіканні відбуваються складні фізико-хімічні процеси (відновлення оксидів, адгезія, дифузія, рекристалізація і таке інше), які сприяють підвищенню щільності та міцності виробів, зніманню внутрішніх напруг тощо. В результаті спікання відбувається значна усадка матеріалу. В зв'язку з тим, що частинки порошку мають високу хімічну активність, операцію спікання часто проводять у вакуумі, захисній або відновлюваній атмосфері. Цю операцію можна інтенсифікувати за рахунок механічної, хімічної або фізичної активації процесу. Механічна активація відбувається при подрібненні порошку (чим дрібніші порошки, тим вони активніші). Хімічна активація відбувається, наприклад, при додаванні водню (або СО). Так, молібден спікають у зволоженому водні, що дозволяє знижувати температуру спікання, а це призводить до підвищення активності Мо. Стрибокоподібні зміни температури, зміна тиску, магнітне, лазерне та електронне опромінювання викликають фізичну активацію. Чим вище температура, тим активніше відбувається процес, але температуру можна підвищувати не завжди. Вплив часу подібен до впливу температури. Але процес спікання не повинен перевищувати 4...6 год, оскільки потім у матеріалі починаються процеси рекристалізації.

Нагрів при спіканні виконують не тільки струмами високої частоти, але й безпосередньо пропускаючи струм між контактами через штапик (заготовку, деталь). Для нагріву також використовують конвеєрні, рольгангові, муфельні та багато інших печей.

Розрізняють такі види спікання: • твердофазні; • рідкофазні; • просочування. При твердофазному температура спікання не перевищує $T_{пл}$ одного металу, або, якщо використовується суміш металів, температуру плавлення найбільш легкоплавкого. При рідкофазному спіканні (за наявності рідкої фази) отримують щільніші вироби з пористістю 1...2 %. За такої технології поверхні твердої фази необхідно добре змочувати рідким металом. Просочування спресованого та спеченого каркасу з тугоплавкого металу здійснюється легкоплавким металом.

Після спікання для одержання кінцевої форми, розмірів і потрібних властивостей вироби з порошкових матеріалів іноді піддають додатковій обробці (різанню, допресовці, термо- і хіміко-термічній обробці тощо).

§ 7.4

Продукція порошкової металургії

Залежно від призначення продукцію порошкової металургії (матеріали та вироби з них) підрозділяють на:

- антифрикційні;
- фрикційні;
- конструкційні;
- фільтраційні;
- електротехнічні;
- твердосплавні.

Антифрикційні матеріали мають стабільний і малий коефіцієнт тертя (0,04...0,06). Пористість таких матеріалів становить від 15 до 35 %. Пори заповнюються маслом, тефлоном або фторопластом. Частіш за все як основу використовують бронзовий або залізний порошок з добавками графіту та інших матеріалів. Бронзографіт за мікроструктурою являє собою зерна твердого розчину олова в міді з вкрапленнями графіту і пор, заповнених мастилом. Структура залізографіту може бути феритна, перлітна та цементитна. В залізо-

графітах з міддю (Cu) або свинцем (Pb) графіту, звичайно, від 1 до 7 %, Cu або Pb від 5 до 7 %, решту становить залізо. Пори, заповнені машинним маслом, у такому матеріалі займають до 20 % об'єму. Після просочування маслом у процесі виготовлення виробів проводять, як правило, калібрування, що зменшує поровий канал.

Антифрикційні матеріали використовують для виготовлення підшипникових втулок, вкладишів, які застосовуються в різноманітних галузях промисловості (автомобільній, верстатобудівній, авіаційній тощо). Такі матеріали можуть працювати при швидкостях тертя від 6 до 30 м/с. Підшипники, в матеріалі яких пори насичені фторопластом, можуть працювати в кислих і лужних середовищах при температурах до 280 °С. Підшипники газових та парових турбін, які працюють за ще більш високих температур, виготовляють з антифрикційних матеріалів, до складу яких входять порошки хромопідкелевих сталей з домішками дисульфиду молібдену.

У фрикційних матеріалах максимальний коефіцієнт тертя стабільний у всьому діапазоні експлуатаційних температур. Фрикційні матеріали з порошків при роботі у маслі мають коефіцієнт тертя від 0,08 до 0,15, а при сухому терті — від 0,3 до 0,7. Пористість таких матеріалів коливається від 10 до 15 %. Основу фрикційних матеріалів становлять складні за хімічним складом композиції міді або заліза з іншими матеріалами. До складу фрикційних матеріалів входять компоненти, що являють собою мастило і запобігають зносу матеріалу (свинець, графіт, різноманітні сульфідні та сірчаноокислі солі), та компоненти, які надають матеріалу високих фрикційних властивостей (азбест, кварцовий пісок, різні оксиди та тугоплавкі з'єднання). Матеріали, одержані за допомогою порошкової металургії, можуть працювати при швидкостях тертя до 50 м/с і напруженнях до 450 МПа, тоді як традиційні матеріали працюють лише за напружень до 50...60 МПа.

Фрикційні матеріали застосовують в літако-, автомобіле- та екскаваторобудуванні, у гальмівних вузлах і вузлах зчеплення. Особливі вимоги пред'являють до відповідних деталей в літакобудуванні. У літаках у момент посадки на вузлах, які піддаються тертю, температура досягає 1100 °С, тому там часто використовують спечені фрикційні металокерамічні матеріали. Енергія тертя знижується за рахунок тепловідводу і високої змащуваності, а тертя створюють неметали типу азбесту та кремнезему. Вельми ефективна для цього металокераміка типу МКВ-50, до складу якої входить від 8 до 10 % С (у вигляді графіту), 4 % ВС (карбід бору), 4 % SiO₂ (кремнезему) та інші добавки.

На цей час до 60 % продукції порошкової металургії становлять конструкційні матеріали, основу яких складає, як правило, залізний порошок з добавками графіту, міді та інших компонентів. Пористість таких матеріалів знаходиться в межах 5...13 %. З них виготовляють кулачки, храповики, шарові вставки, корпуси підшипників, зірочки розподільчих валів, деталі обчислювальної техніки (шестерні, привід принтерів тощо). Особливо активно ці матеріали використовуються в автомобілебудуванні. У США при виготовленні одного серійного автомобіля середнього класу витрачається до 16 кг порошкоподібного матеріалу, з якого роблять гайки, фланці, з'єднання поршневих груп. При виготовленні ненавантажених та малонавантажених деталей застосовують подвійне пресування, а для високонавантажуваних деталей — динамічне.

Фільтруючі матеріали (фільтри) можна виготовляти з будь-яких порошкових матеріалів. Часто використовують порошки нікелю, срібла, титану, бронзи, нержавіючих сталей та інші матеріали. При спіканні таких порошоків (з наповнювачем або при вільній засипці) поровий канал не повинен закриватися, а пористість кінцевого продукту має бути не нижча за 25...50 %.

Фільтри з порошкових матеріалів широко використовують в промисловості для фільтрації палива, різних мастил і смол, очистки газів та повітря від пилу, фільтрації розплавлених низькоплавких металів, кислот, лугів та інших продуктів хімічної промисловості. В особливих випадках використовують двохшарові фільтри (внутрішня частина яких із мілких частинок порошку, а зовнішня — з більш крупних). Спеціальні фільтри можуть затримувати частинки розміром від 0,5 мкм і працювати в діапазоні температур від надзвичайно низьких (– 273 °C) до вельми високих (700...900 °C).

Переваги порошкових фільтрів порівняно з традиційними (тканинними, повстяними, картонними та іншими) у тому, що вони міцніші і після забруднення їх можна піддавати регенерації.

До електротехнічних матеріалів відносять електроконтактні та магнітні. Електроконтактні повинні мати низький контактний та перехідний опір, але високу міцність і твердість, тобто це можуть бути композити типу Cu — W та подібні до них. При замиканні таких контактів і виникненні дуги оксид кадмію або мідь випаровується і робить дугу такою, що проводить, внаслідок чого вона загасає. Для цього слід використовувати металокерамічні контакти типу А10М або А30. Застосовують їх для розривних та ковзаючих контактів, а також у динамомашинах. Спечені розривні контакти забезпечують до 3 млн вмикань.

Магнітні матеріали вельми чутливі до наявності в них домішок, і в зв'язку з цим дія пористості негативна. Магнітом'які матеріали (з малою коерцитивною силою) готують з чистого залізного порошку або порошків на основі оксиду заліза, вони швидко намагнічуються і розмагнічуються. Магнітотверді матеріали (постійні магніти з високою коерцитивною силою) одержують із сумішей порошків Fe — Ni, Fe — Al та інших. На цей час створено такі магнітотверді матеріали, 1 г власної ваги яких може утримувати більше 1 кг навантаження.

З феритних порошків (оксидні з'єднання типу Fe_2O_3 — MeO) у композиції з 5...15 % ізоляційних матеріалів (фенольні смоли, силікати, каучук та інші) шляхом пресування і спікання одержують також магнітодіелектрики.

Твердосплавні інструментальні матеріали, які виготовляють з дисперсних порошків карбідів вольфраму, титану, танталу (WC, TiC, TaC) з добавками порошку кобальту (Co), а також мінералокерамічні матеріали на основі порошку оксиду алюмінію (Al_2O_3) буде розглянуто далі (див. розділ 4, гл. 11, § 11.3).

Контрольні запитання

1. У чому сутність порошкової металургії?
2. Які науково-технічні завдання вирішує порошкова металургія?
3. Які технологічні методи виробництва порошків відносять до групи механічних?
4. Які технологічні методи виробництва порошків відносять до групи фізико-хімічних?
5. На які три групи підрозділяють властивості порошків, чим вони характеризуються і як оцінюються?
6. Які технологічні процеси здійснюються під час виробництва матеріалів та виробів з порошків?
7. Як класифікується продукція порошкової металургії?
8. Які матеріали порошкової металургії відносять до антифрикційних, а які до фрикційних?
9. Які матеріали порошкової металургії відносять до фільтруючих?
10. Які властивості мають мати матеріали порошкової металургії, що відносяться до електротехнічних (електроконтактні та магнітні)?

Глава 8

Неметалеві конструкційні матеріали

До неметалевих матеріалів відносять пластмаси, гуми, деревину, клеї, лакофарбові матеріали тощо. В машинобудуванні неметалеві матеріали широко використовують для виготовлення з них різноманітних виробів, а також як замітники металів. Неметалеві матеріали забезпечують необхідні механічні властивості, хімічну стійкість, водо- та газонепроникність, високі ізоляційні властивості та інші цінні якості.

§ 8.1

Полімери

Полімерами називають речовини, макромолекули яких складаються з численних елементарних ланок (мономерів) однакової структури. Властивості цих речовин визначаються не тільки хімічним складом молекул, але і їх взаємним розташуванням і будовою.

Макромолекула полімеру — це ланцюг, що складається з окремих ланцюжків. Поперечний переріз ланцюга дорівнює кільком ангстремам, а довжина — кільком тисячам ангстрем. Тому макромолекулам полімеру властива гнучкість, яка є однією з основних їх особливостей.

Натуральний каучук, целюлоза, слюда, азбест, природний графіт — усі вони є природними полімерами. Однак основною групою є синтетичні полімери, які отримують в процесі хімічного синтезу з низькомолекулярних сполук. Синтезом можна отримувати

полімери з різноманітними властивостями і навіть створювати матеріали із заздалегідь заданими характеристиками (властивостями).

Своєрідність властивостей полімерів зумовлена структурою їх макромолекул. За формою макромолекул полімери поділяються на:

- лінійні (ланцюгові);
- розгалужені;
- сітчасті (плоскі, просторові).

Лінійні макромолекули полімеру мають довгу зигзагоподібну форму або є закрученими в спіраль ланцюжками (рис. 8.1). Гнучкі макромолекули з високою міцністю вздовж ланцюга і слабкими міжмолекулярними зв'язками забезпечують еластичність матеріалу, здатність його розм'якшуватися при нагріванні, а при охолодженні знову тверднути. Більшість таких полімерів розчиняються у певних розчинниках. Лінійні полімери є найбільш придатними для отримання волокон і плівок (наприклад, поліетилен, поліаміди та інші).

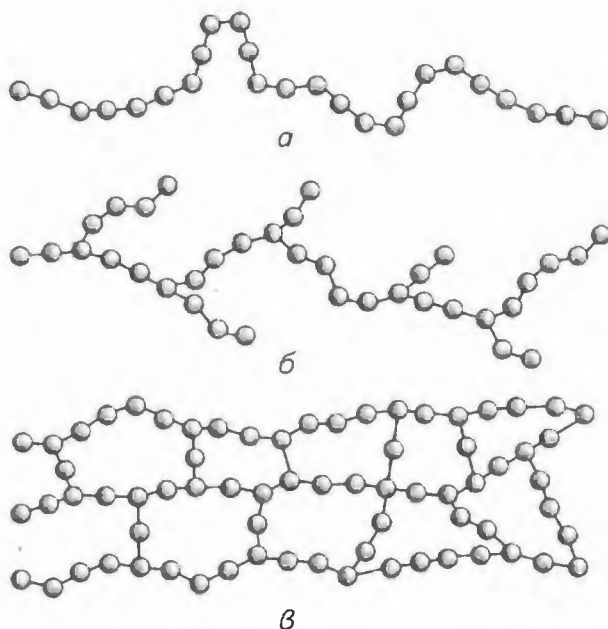


Рис. 8.1

Форми макромолекул полімерів:

а — лінійна; б — розгалужена; в — сітчаста

Сітчасті (просторові) полімери мають високу пружність (наприклад, м'які гуми). Густосітчасті (просторові) полімери відрізняються твердістю, підвищеною теплостійкістю, нерозчинністю.

Полімери можуть бути в аморфному та кристалічному стані. При переході полімеру з аморфного до кристалічного стану суттєво змінюються його фізико-механічні властивості, підвищуються міцність та теплостійкість.

До полімерів, що кристалізуються, відносяться поліетилен, поліпропілен, поліаміди тощо. Кристалізація їх здійснюється в певному інтервалі температур. За звичайних умов повної кристалізації не відбувається. В зв'язку з цим реальні полімери мають двофазну структуру: нарівні з кристалічною фазою є й аморфна. Кристалічний стан надає полімеру підвищену теплостійкість, велику міцність.

За відношенням до нагріву полімери поділяють на термопластичні і термореактивні:

- *термопластичні* полімери при нагріванні розм'якшуються (навіть плавляться), а при охолодженні тверднуть. Цей процес є зворотним. Структура макромолекул таких полімерів лінійна або розгалужена. Типовими представниками термопластів є поліетилен, полістирол, поліамід та інші;
- *термореактивні* полімери на першій стадії утворення мають лінійну структуру і при нагріванні розм'якшуються, потім внаслідок хімічних реакцій тверднуть (утворюють просторову структуру) і надалі залишаються твердими. Твердий стан полімеру називається *термостабільним*. Прикладом термореактивних полімерів можуть слугувати фенолоформальдегідна, гліфталева та інші смоли.

Механічні властивості полімерів (міцність, пружність) залежать від структури, фізичного стану, температури тощо. Полімери можуть знаходитися в трьох фізичних станах: склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому:

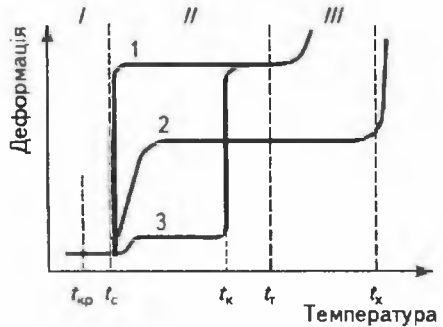
- *склоподібний* стан характеризується тим, що атоми, які входять до складу молекулярного ланцюга, здійснюють коливальні рухи навколо положення рівноваги; рух ланцюгів і переміщення макромолекул не відбувається;
- *високоеластичний* стан властивий тільки високополімерам і характеризується здатністю матеріалу до великих зворотних змін форми при невеликих навантаженнях (ланцюги коливаються і макромолекула набуває здатності згинатися);

- в'язкотекучий стан нагадує рідкий стан, але відрізняється від нього дуже великою в'язкістю. Зі зміною температури лінійний або розгалужений полімер може перейти з одного фізичного стану в інший.

Графічна залежність деформації, що розвивається за певний час при заданому напруженні, від температури називається *термомеханічною кривою* (рис. 8.2). При температурі нижче $t_{кр}$ полімери є крихкими. Температура t_c відповідає температурі їх склування. Полімери з просторовою структурою перебувають тільки в склоподібному

Рис. 8.2

Термомеханічні криві некристалічного лінійного (1), кристалічного (2), дрібносітчастого (3) полімерів ($t_{кр}$, t_c , t_k , t_t , t_x відповідно температури крихкого руйнування, склування, кристалізації, початку в'язкої течії та початку хімічного розкладу. Ділянки I — III відповідно склоподібного, високоеластичного та в'язкотекучого стану



стані. Дрібносітчаста структура дозволяє отримувати полімери в склоподібному і високоеластичному станах. Високоеластичний стан характеризується значними зворотними деформаціями. На ділянці, що відповідає цьому стану, розвиваються пружна і високоеластична деформації. Кристалічні полімери при температурі нижче температури плавлення (кристалізації) t_k є твердими. Поблизу точки t_t , крім пружної і високоеластичної, виникає також пластична деформація. Для кристалічних полімерів (поліетилен, поліамід, поліетилен — терефталат тощо) залежність напруження від деформації визначається температурою. Зі зміною температури характер кривих змінюється, і при $t < t_c$ він подібний до кривих, характерних для склоподібних полімерів.

Усі полімери в температурному інтервалі $t_c — t_t$ перебувають у високоеластичному стані.

Температура t_x відповідає хімічному розкладу дрібносітчастого полімера (гуми).

Старіння полімерів. Під старінням полімерних матеріалів розуміють незворотну зміну найважливіших технічних характеристик,

що відбуваються внаслідок складних хімічних і фізичних процесів, які розвиваються в матеріалі при експлуатації і зберіганні. Причинами старіння є світло, теплота, кисень, озон та інші немеханічні чинники. Старіння прискорюється при багаторазових деформаціях. Менш істотно на старіння впливає волога. Розрізняють старіння • теплове, • світлове, • озонне, • атмосферне.

Суть процесу старіння полімерів полягає в складній ланцюговій реакції, яка протікає з утворенням вільних радикалів та супроводжується деструкцією (руйнуванням зв'язків між атомами та молекулами) і структуруванням полімеру. Зазвичай старіння є результатом окислення полімеру атмосферним киснем. Якщо переважає деструкція, то полімер розм'якшується і виділяються летючі речовини (наприклад, натуральний каучук).

При структуруванні підвищуються твердість, крихкість, спостерігається втрата еластичності. При температурах 200...500 °C і вище відбувається термічне розкладання органічних полімерів, що супроводжується випаровуванням летючих речовин.

Пластмаси — це штучні матеріали, які виготовляють на основі органічних полімерних речовин. Ці матеріали здатні при нагріванні розм'якшуватися, ставати пластичними. Тоді під тиском їм можна надати задану форму, яка потім зберігається. Залежно від природи зв'язуючої речовини перехід відформованої маси в твердий стан здійснюється при подальшому її нагріванні або охолодженні. *Зв'язуюча речовина* є обов'язковим компонентом пластмас. Для більшості пластмас як зв'язуюче використовують синтетичні смоли, рідше — ефірцелюлози. Більшість пластмас, головним чином термопластичні, складаються з однієї зв'язуючої речовини (наприклад, поліетилен, органічне скло тощо).

Важливим компонентом пластмас є *наповнювач* — порошкоподібні, волокнисті та речовини органічного і неорганічного походження. Наповнювачі підвищують механічні властивості, знижують усадку при пресуванні й додають матеріалу відповідних специфічних властивостей (наприклад, фрикційні, антифрикційні).

Для підвищення пластичності в напівфабрикат додають *пластифікатори* (органічні речовини з високою температурою кипіння і низькою температурою замерзання), наприклад олеїнову кислоту, стеарин, дибутилфталат тощо. Пластифікатори надають пластмасам еластичність, що полегшує їх обробку.

Властивості пластмас залежать від складу окремих компонентів, їх поєднання і кількісного співвідношення, що дає можливість змінювати характеристики пластмас в широких межах.

Залежно від природи зв'язуючої речовини пластмаси поділяють на *термопластичні* (термопласти) — на основі термопластичних полімерів, і *термореактивні* (реактопласти) — на основі термореактивних смол. Термопласти зручні для переробки у виробі, дають незначну усадку при формуванні (1...3 %). Матеріал відрізняється великою пружністю і незначною крихкістю. Термореактивні полімери після тверднення і переходу зв'язуючого в термостабільний стан крихкі, часто дають значну усадку (до 10...15 %) при переробці, тому до їх складу вводять зміцнюючі наповнювачі.

Термопластичні пластмаси. Основу цих пластмас складають полімери лінійної або розгалуженої структури, такі як поліетилен. Термопластичні пластмаси застосовують як прозоре органічне скло, високо- і низькочастотні діелектрики, хімічно стійкі матеріали.

Деталі, виготовлені з таких матеріалів, експлуатуються в обмеженому інтервалі температур. При нагріванні до температур вище 60...70 °С починається різке зниження фізико-механічних властивостей пластмаси, хоча більш теплостійкі пластмаси можуть використовуватися при 150...250 °С. Термостійкі полімери з жорсткими ланцюгами і циклічною структурою стійкі до 400...600 °С.

Поліетилен — продукт полімеризації етилену, є хімічно стійким. Недоліком його є схильність до старіння. Для захисту від старіння в поліетилен вводять стабілізатори та інгібітори (2 — 3 % сажі уповільнюють процеси старіння у 30 разів).

Поліетилен використовують для виготовлення литих труб і пресованих несилкових деталей (наприклад, вентилі, контейнери), поліетиленових плівок для ізоляції дроту і кабелів, чохлаів, скління парників, облицювання водоймищ. Крім того, поліетилен використовують як покриття на металах для захисту від корозії, вологи, електричного струму тощо.

Поліпропілен є похідним етилену. Це жорсткий нетоксичний матеріал з високими фізико-механічними властивостями. У порівнянні з поліетиленом цей пластик більш теплостійкий — зберігає форму до температури 150 °С. Поліпропіленові плівки міцні і більш газонепроникні, ніж поліетиленові, а волокна еластичні, міцні і хімічно стійкі. Недоліком пропілену є його невисока морозостійкість (до -10...-20 °С). Поліпропілен використовують для виготовлення труб, конструкцій і деталей автомобілів, мотоциклів, холодильників, корпусів насосів, різних ємностей тощо.

Полістирол — твердий, міцний, прозорий, аморфний полімер. За діелектричними характеристиками близький до поліетилену, зручний

для механічної обробки, добре забарвлюється. Полістирол розчиняється в неполярних розчинниках (наприклад, бензолі), водночас він хімічно стійкий до кислот і лугів; нерозчинний в спиртах, бензині, маслах, воді. Недоліком полістиролу є його невисока теплостійкість, схильність до старіння та утворення тріщин.

Ударостійкий полістирол має у 3...5 разів більшу міцність на удар і у 10 разів більше відносне видовження порівняно зі звичайним полістиролом. З полістиролу виготовляють деталі для радіотехніки, деталі машин і механізмів, ємкості для води і хімікатів, плівки, труби тощо.

Фторопласт — термічно і хімічно стійкий матеріал. Основним представником полімерів, що містять фтор, є поліфторетилен. Нагрівання до 250 °С не впливає на його механічні властивості, тому використовувати фторопласт можна до цієї температури. Руйнування матеріалу відбувається при температурі вище 415 °С. Температура склування становить -120 °С, але навіть при дуже низьких температурах (до -260 °С) пластик не окрихчується. Фторопласт стійкий до дії розчинників, кислот, лугів, окислювачів. Це найбільш високоякісний діелектрик і його діелектричні властивості в широкому діапазоні температур майже не змінюються. Фторопласт має дуже низький коефіцієнт тертя ($f = 0,04$), який зберігається до температури 327 °С.

Фторопласт застосовують при виготовленні труб для хімікатів, деталей (вентилі, крани, насоси, мембрани), ущільнюючих прокладок, манжет, сільфонів, електрорадіотехнічних деталей, антифрикційних покриттів на металах (підшипники, втулки).

Органічне скло — це прозорий аморфний термопласт на основі складного ефіру акрилової і метакрилової кислот. Матеріал у два рази легший за мінеральне скло ($\rho = 1,18 \text{ г/см}^3$), відрізняється високою атмосферною стійкістю, оптично прозорий (світлопрозорість 92 %), пропускає 75 % ультрафіолетових променів (силікатне скло пропускає 0,5 %). При 80 °С органічне скло починає розм'якшуватися, при 105...150 °С з'являється пластичність, що дозволяє формувати з нього різні деталі.

Недоліком органічного скла є невисока поверхнева твердість. Органічне скло використовують в літако- і автомобілебудуванні. З органічного скла виготовляють світлотехнічні деталі, оптичні лінзи тощо.

Вініпласт — непластифікований твердий полівінілхлорид. Вініласти мають високу механічну міцність і пружність. З нього виго-

товляють труби для подачі агресивних газів, рідин і води, захисні покриття для електропроводки, деталі вентиляційних установок, теплообмінників, захисні покриття для металевих ємностей, будівельні облицьовувальні плитки. Крім того, вінілпластом облицьовують гальванічні ванни. Недоліками цього матеріалу є низька міцність і робоча температура під навантаженням (60...70 °C), великий коефіцієнт лінійного розширення, крихкість при низьких температурах ($t_{кр} = -10$ °C, $t_r = 90...95$ °C).

Термореактивні пластмаси. В цих пластмасах як зв'язуючі речовини застосовують термореактивні смоли, до яких іноді вводять пластифікатори, прискорювачі або уповільнювачі та розчинники. Основними вимогами до зв'язуючих речовин є висока здатність до склеювання (адгезія), висока теплостійкість, хімічна стійкість і електроізоляційні властивості, простота технологічної переробки, незначна усадка і відсутність токсичності.

Для виробництва пластмас широко використовують фенолформальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні смоли та різні їх модифікації. Більш високою адгезією до наповнювача володіють епоксидні зв'язуючі речовини, які дозволяють отримувати армовані пластики з високою механічною міцністю. Теплостійкість склопластиків при тривалому нагріванні становить: на кремнійорганічному зв'язуючому від 260 до 370 °C, на фенолформальдегідному — до 260 °C, на епоксидному — до 200 °C і на поліамідному зв'язуючому 280...350 °C.

Важливою властивістю епоксидних смол є здатність їх до твердіння не тільки при підвищеній, але й при кімнатній температурах без виділення побічних продуктів з мінімальною усадкою. Це дає змогу виготовляти з них великогабаритні вироби.

Скловолокніти — це матеріали, що складаються зі зв'язуючого — синтетичної смоли і скловолокнистого наповнювача. Скловолокно отримують продавлуванням розпавленої скломаси крізь фільтри (отвори у днищі електропечі). Як наповнювач застосовують суцільне або коротке волокно.

Властивості скловолокна залежать також від вмісту в ньому лугу. До термостійких відносяться кварцеве, кремнеземне, алюмосилікатне ($t_{пл} = 1650...1700$ °C) волокна. Скловолокно не горить, хімічно стійке, а також стійке до дії ультрафіолетових променів.

Механічні властивості скловолокна дозволяють пресувати з нього деталі складної форми з металевою арматурою. Матеріал має ізотропні характеристики міцності, набагато вищі, ніж у преспорошків

і волокнитів. Застосовують їх для виготовлення силових електротехнічних деталей, деталей в машинобудуванні, для великогабаритних виробів простої форми (кузови автомашин, човнів, корпуси приладів тощо).

Гетинакс отримують на основі модифікованих фенольних, аніліноформальдегідних, карбомідних смол і різних сортів паперу. За призначенням гетинакс поділяють на електротехнічний (для панелей, щитків) і декоративний, який може мати різні кольори і текстуру (імітує породи дерева). Пластик можна застосовувати при температурі 120...140 °С. Він стійкий до дії хімікатів, розчинників, харчових продуктів; використовується для внутрішнього облицювання пасажирських салонів літаків, залізничних вагонів, кают суден, у виготовленні меблів.

Текстоліт (зв'язуюче — термореактивні смоли, наповнювач — бавовняні тканини). Серед шаруватих пластиків текстоліт найбільш здатний поглинати вібраційні навантаження, чинити опір розколюванню. Залежно від призначення текстоліти поділяють на конструкційні (ПТК, ПТ, ПТМ), електротехнічні, графітізовані, гнучкі, прокладочні. Текстоліт як конструкційний матеріал застосовується для зубчастих коліс, які працюють безшумно при частоті обертання до 30 000 об/хв. Довговічність текстолітових вкладишів підшипників у 10...15 разів довша за бронзові. Проте робоча температура текстолітових підшипників невисока (80...90 °С). Вони застосовуються в пркатних станах, відцентрових насосах, турбінах тощо.

Азботекстоліт містить 38...43 % зв'язуючої речовини, решта — азбестова тканина. Азботекстоліт є конструкційним, фрикційним і термоізоляційним матеріалом. Найбільшу теплостійкість має матеріал на кремнійорганічному зв'язуючому (300 °С). З азботекстоліту виготовляють лопатки ротаційних бензонасосів, фрикційні диски, гальмівні колодки (без змащення коефіцієнт тертя $f = 0,3...0,38$, з мастилом $f = 0,05...0,07$).

Азботекстоліт короткочасно витримує високі температури та застосовується як теплозахисний і теплоізоляційний матеріал (протягом 1...4 год витримує температуру 250...500 °С і короткочасно — біля 3000 °С).

Склотекстоліт на фенолформальдегідному зв'язуючому недостатньо вібраційно-міцний, але порівняно зі звичайним текстолітом він більш теплостійкий і має кращі електроізоляційні властивості. Склотекстоліти на основі кремнійорганічних смол (СТК, СК-9Ф, СК-9А) мають відносно невисоку механічну міцність, але відрізняються високою тепло- і морозостійкістю, стійкі до окислювачів та

інших хімічно активних реагентів, не викликають корозії металів. Епоксидні зв'язуючі (ЕД-8, ЕД-10) забезпечують склотекстолітам високі механічні властивості, що дає змогу виготовляти з них великогабаритні деталі. Склотекстоліти на основі ненасичених поліефірних смол (ПН-1) також не потребують високого тиску при пресуванні і застосовуються для виготовлення великогабаритних деталей.

Склопластики можуть працювати тривалий час при 200...400 °С, однак короткочасно — протягом кількох десятків секунд — склопластики витримують кілька тисяч градусів. За дії високих температур поверхневі шари матеріалу вигорають. Теплопровідність пластиків у сотні разів менша за метали, тому за короткочасної дії високої температури внутрішні шари матеріалу нагріваються до 200...350 °С і зберігають міцність.

Склопластики є конструкційним матеріалом, який використовують для силових виробів у різних галузях техніки (несучі деталі літаків, кузови і кабіни автомобілів, автоцистерни, залізничні вагони, корпуси суден). Зі склопластиків виготовляють корпуси машин, кожухи, захисні огорожі, вентиляційні труби, бачки, рукоятки, контейнери тощо.

§ 8.2

Гумові матеріали

Гумою називається продукт хімічного перетворення (вулканізації) суміші каучуку та сірки з різними добавками. При виготовленні гуми та гумових виробів спочатку отримують сиру гуму (суміш усіх цих речовин), після чого проводять вулканізацію при 145...150 °С. При вулканізації змінюється молекулярна структура полімеру (утворюється просторова сітка), що приводить до зміни його фізико-механічних властивостей: різко зростає міцність на розтяг і еластичність каучуку, а пластичність майже повністю зникає (наприклад, натуральний каучук має $\sigma_B = 1,0...1,5$ МПа, після вулканізації $\sigma_B = 35$ МПа). Крім того, збільшується твердість та опір зношуванню.

Гума як технічний матеріал відрізняється від інших матеріалів високою еластичністю, яка властива каучуку — головному вихідному компонентові гуми. Вона здатна до дуже значних деформацій

(відносно видовження перевищує 1000 %), які майже повністю зворотні. При кімнатній температурі гума перебуває у високо-еластичному стані. Її еластичні властивості зберігаються в широкому діапазоні температур. Особливістю гуми як технічного матеріалу є релаксаційний характер деформації. При кімнатній температурі час релаксації може становити 4...10 с і більше.

Для гумових виробів характерні висока стійкість до стирання, газо- і водонепроникність, хімічна стійкість, електроізоляційні властивості та незначна питома вага.

Сукупність технічних властивостей гумових матеріалів дає змогу застосовувати їх для амортизації та демпфірування, ущільнення і герметизації в умовах повітряних і рідких середовищ, хімічного захисту деталей машин, трубопроводів, шлангів, для покришок і камер коліс літаків та автотранспорту тощо. Номенклатура гумових виробів налічує понад 40 000 найменувань.

За призначенням у машинобудуванні гумові деталі поділяють на такі групи:

- ущільнювачі;
- вібро- та звукоізолятори;
- протиударні;
- силові (шестерні, корпуси насосів, муфти, шарніри);
- антифрикційні;
- фрикційні деталі та інструменти;
- несилкові та захисні;
- декоративні.

Склад і класифікація гум. Основою гуми слугує натуральний (НК) або синтетичний (СК) каучук, який визначає основні властивості гумового матеріалу. Для покращення фізико-механічних властивостей до каучуку додають різні добавки.

Вулканізуючі речовини (агенти). Найчастіше як вулканізуючі речовини застосовують сірку і селен, іноді — перекиси. Для гуми електротехнічного призначення замість елементарної сірки (яка взаємодіє з міддю) застосовують органічні сірчисті сполуки — тіурам.

Антиоксиданти — речовини, що сповільнюють процес старіння гуми, який призводить до погіршення її експлуатаційних властивостей. Для цього використовують парафін та віск, які утворюють поверхневі захисні плівки.

Пластифікатори (розм'якшувачі) полегшують переробку гумової суміші, збільшують еластичні властивості каучуку, підвищують морозостійкість гуми. Як розм'якшувачі у гуму вводять парафін,

вазелін, стеаринову кислоту, бітуми, дибутилфталат, рослинні олії. Кількість розм'якшувачів становить 10...30 % від маси каучуку.

Наповнювачі за впливом на каучук поділяють на активні (підсилюючі) та неактивні (інертні). Активні наповнювачі (вуглецева та біла сажа, кремнієва кислота, оксид цинку й інші) підвищують механічні властивості гум: міцність, опір стиранню, твердість. Неактивні наповнювачі (крейда, тальк, барит) вводяться для здешевлення вартості гуми.

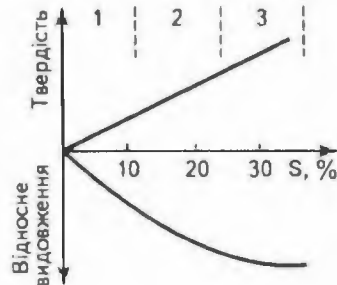


Рис. 8.3

Залежність типу отриманої гуми від кількості сірки:

1 — гума; 2 — напівебоніт; 3 — ебоніт

Часто до складу гумової суміші вводять продукт переробки старих гумових виробів і відходів гумового виробництва (регенерат). Крім зниження вартості, регенерат підвищує якість гуми, знижуючи її схильність до старіння.

Барвники мінеральні або органічні вводять для забарвлення гум. Деякі фарбуючі речовини (білі, жовті, зелені) поглинають короткохвильову частину сонячного спектра і цим захищають гуму від світлового старіння.

Основним компонентом гуми крім каучуку є сірка. Залежно від кількості сірки, що вводиться в гуму, одержують різну частоту сітки полімеру. При введенні 1...5 % сірки утворюється рідка сітка і гума виходить високоеластичною, м'якою. Зі збільшенням процентного вмісту сірки сітчаста структура стає все щільнішою, а гума — більш твердою. При максимально можливому (30 %) насиченні каучуку сіркою утворюється твердий матеріал, що має назву *ебоніт*. Залежність типу отриманої гуми від кількості сірки наведена на рис. 8.3.

Гуми загального призначення. До таких гум відносять вулканізати неполярного каучуку — натуральний каучук (НК), синтетичний каучук бутадієновий (СКБ), бутадієн-стирольний каучук (СКС), синтетичний каучук ізопреновий (СКИ).

Натуральний каучук (НК) є полімером ізопрену (C_5H_8)_n. Розчиняється він у жирних і ароматичних розчинниках (бензині, бен-

золі, хлороформі, сірковуглеці тощо), утворюючи в'язкі розчини, що використовують як клеї. При нагріванні вище 80...100 °С каучук стає пластичним і при 200 °С починає розкладатися. При -70 °С НК стає крихким. Для отримання гуми НК вулканізують сіркою. Гуми на основі НК відрізняються високою еластичністю, міцністю, водо- і газонепроникністю, високими електроізоляційними властивостями.

Синтетичний каучук бутадієновий (СКБ) отримують за методом Лебедева. Формула полібутадієну $(C_4H_6)_n$. Це некрystalічний каучук, що має низьку межу міцності при розтягуванні. В гуму на його основі необхідно вводити посилюючі наповнювачі (сажу, оксид, цинк та інші). Морозостійкість СКБ невисока (-40... -45 °С). Розбухає він у тих же розчинниках, що і НК.

Бутадієн-стирольний каучук (СКС) отримують при спільній полімеризації бутадієну (C_4H_6) і стиrolу $(CH_2=CH-C_6H_5)$. З такого каучуку отримують гуми з високим опором старінню, які добре працюють в умовах циклічних деформацій. За газонепроникністю і діелектричними властивостями вони рівноцінні гумам на основі НК. Каучук СКС-10 можна використовувати при температурах -74... -77 °С.

Синтетичний каучук ізопреновий (СКИ)— це продукт полімеризації ізопрену C_5H_8 . Отримання СКИ стало можливим у зв'язку з використанням нових видів каталізаторів (наприклад, літію). За будовою, хімічними і фізико-механічними властивостями СКИ близький до натурального каучуку.

Гуми загального призначення можуть працювати в середовищі води, повітря, неконцентрованих розчинів кислот і лугів. Інтервал робочих температур становить від -35...-50 до 80...130 °С. З таких гум виготовляють шини, паси, шланги, транспортні стрічки, ізоляцію кабелів, різні гумотехнічні вироби.

Як і пластмаси, гуми схильні до процесу старіння, яке спостерігається при зберіганні та експлуатації гумових виробів під впливом світла, тепла, кисню та озону. Старіння по-різному позначається на механічних властивостях гум. Температура і тривалість старіння звичайно зумовлюють зниження міцності та підвищення твердості різних гум.

Гуми спеціального призначення. Такі гуми поділяють на: маслобензостійкі, теплостійкі, світлоозоностійкі, зносостійкі, електротехнічні, стійкі до гідравлічних рідин.

Маслобензостійкі гуми отримують на основі каучуку хлоропренового (наірит), бутадієн-нітрильного та тіоколу.

Наірит є хлоропреновим каучуком. Вулканізація може проводитися термообробкою, навіть без сірки, оскільки під дією температури

каучук переходить в термостабільний стан. Гуми на основі наїриту мають високу еластичність, вібростійкість, озоностійкість. Вони стійкі до дії палива і мастил, чинять опір тепловому старінню.

За термостійкістю і морозостійкістю ($-35...-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) вони поступаються як НК, так і СК.

Бутадієн-нітрильний каучук (СКН) — це продукт спільної полімеризації бутадієну з нітрилом акрилової кислоти.

Вулканізують СКН за допомогою сірки. Гуми на основі СКН мають високу міцність ($\sigma_{\text{в}} = 0,34\text{ МПа}$), спроможні чинити опір стиранню, але за еластичністю поступаються гумам на основі НК, мають високу стійкість щодо старіння та дії розбавлених кислот і лугів.

Маслобензостійкі гуми працюють в середовищі бензину, палива, мастил в інтервалі температур від $-30...-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100...130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Гуми на основі СКН застосовують для виробництва пасів, транспортних стрічок, металорукавів, маслобензостійких гумових деталей (ущільнюючі прокладки, манжети тощо).

Механічні властивості гуми на основі тіоколу невисокі. Еластичність гум зберігається при температурі $-40...-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплостійкість не перевищує $60...70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Морозостійкими є гуми на основі каучуку, що мають низькі температури склування. Наприклад, гуми на основі СКС можуть працювати при температурі до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Зносостійкі гуми отримують на основі поліуретанових каучуків СКУ. Такі каучуки мають високу міцність, еластичність, опір стиранню, маслобензостійкість, а його газонепроникність в $10...20$ разів вища за НК. Робочі температури гум на його основі становлять від -30 до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Гуми на основі СКУ застосовують для виготовлення автомобільних шин, транспортних стрічок, взуття, для обкладання труб і жолобів, якими транспортуються абразивні матеріали, тощо.

§ 8.3

Клеї

Клеями називають колоїдні розчини плівкотвірних полімерів, що здатні при твердненні утворювати міцні плівки, які добре прилипають до поверхонь різних матеріалів.

Клейові з'єднання порівняно з іншими видами нероз'ємних з'єднань (клепанними, зварними) мають ряд переваг: можливість з'єд-

нання різних матеріалів (металів і сплавів, пластмас, скла, кераміки та інші); атмосферостійкість і стійкість проти корозії клейового шва; герметичність з'єднання; можливість з'єднання тонких матеріалів; зниження вартості виробництва; зменшення маси і значне спрощення технології виготовлення виробів.

Недоліками клейових з'єднань є відносно низька тривала теплостійкість (до 350 °С), зумовлена органічною природою плівкоутворювача; часта необхідність проведення склеювання з нагріванням; схильність до старіння.

Міцність склеювання забезпечується адгезією та когезією.

Адгезія (прилипання) — це здатність плівки клею міцно утримуватися на поверхні матеріалів, що склеюються. Адгезія — результат дії електростатичних сил, які завжди виникають при контакті різних тіл.

Когезія — це власна міцність плівки. Робота когезії — це робота, що затрачується на подолання сил зчеплення між частинками всередині однорідного тіла. Міцність склеювання можна підвищити шляхом механічного зчеплення плівки клею з шорсткою поверхнею матеріалу.

До складу клеючих матеріалів входять такі компоненти:

- *плівкотвірна речовина* — основа клею, яка визначає адгезійні, когезійні властивості клею і основні фізико-механічні характеристики клейового з'єднання;
- *розчинники*, що створюють певну в'язкість клею;
- *пластифікатори* — для усунення усадочних явищ в плівці і підвищення її еластичності;
- *твердники і каталізатори* — для переведення плівкоутворюючої речовини в термостабільний стан;
- *наповнювачі* — для зменшення усадки клейової плівки, підвищення міцності склеювання.

Залежно від речовини, яка утворює плівку, клеї поділяють на:

- смоляні;
- гумові.

Смоляні клеї можуть бути термореактивними і термопластичними. Термореактивні смоли (фенолоформальдегідні та епоксидні) дають міцні, теплостійкі плівки. Такі клеї використовують для склеювання силових конструкцій з металів і неметалевих матеріалів. Клеї на основі термопластичних смол (полівінілацетат, акрилат та інші) мають невисоку міцність, особливо при нагріванні, і використовуються для несильових з'єднань неметалевих матеріалів.

Фенолокауучкові клеї є еластичними теплостійкими плівками з високою адгезією до металів. До них відносяться клеї ВК-3, ВК-4, ВК-13 та інші.

Такі з'єднання теплостійкі, добре витримують циклічні навантаження, завдяки еластичності плівки забезпечується міцність з'єднання при нерівномірному відриві. Ці клеї водостійкі і можуть використовуватися за різних кліматичних умов для склеювання конструкцій зі склопластиків.

Фенолополівінілацеталеві композиції найбільш широко використовуються в клеях БФ. Клеї БФ-2 і БФ-4 — це спиртові розчини фенолоформальдегідної смоли з полівінілбутиралем. Клеї БФ-2 і БФ-4 використовують для склеювання металів, пластмас, кераміки та інших твердих матеріалів. Теплостійкість клейових з'єднань невисока, водостійкість задовільна.

Фенолокремнійорганічні клеї містять як наповнювач азбест та алюмінієвий порошок. Ці клеї термостійкі, вони стійкі до води і тропічного клімату, мають високу вібростійкість і міцність. Клеї ВК-18 і ВК-18М можуть працювати при температурах 500...600 °С (їх застосовують для склеювання інструментів).

Клеї на основі епоксидних смол. Тверднення таких клеїв відбувається за допомогою твердників без виділення побічних продуктів, що майже не дає усадки у клейовій плівці. Тверднення смоли здійснюється як холодним, так і гарячим способом. До клеїв холодного тверднення відносять Л-4, КЛН-1, ВК-16, ЭПО. Епоксидні клеї гарячого тверднення К-153, ФЛ-4С, ВК-1 є конструкційними силовими клеями. Їх застосовують для склеювання металів, склопластиків, кераміки. Для всіх епоксидних клеїв характерна висока механічна міцність, стійкість до впливу атмосфери, стійкість до палива і мінеральних мастил, високі діелектричні властивості. Однак ці матеріали з часом "старіють". В умовах експлуатації і при зберіганні склеєних виробів настає окрихчування клею, яке відбувається тим швидше, чим вища температура.

Поліуретанові клеї. Композиції можуть бути холодного і гарячого тверднення. До складу клею входять поліефіри, поліізоціанати і наповнювач (цемент). При змішуванні компонентів відбувається хімічна реакція, внаслідок якої клей твердне. Такі клеї токсичні. Вони характеризуються високою вібростійкістю та міцністю при нерівномірному відриві, стійкістю до нафтових палив і мастил. Прикладом поліуретанових клеїв є ПУ-2, ВК-5, ВК-11, ВК-20, які тривалий час можуть працювати при температурі 350...400 °С і короткочасно — при 800 °С.

Гумові клеї, в яких основним плівкоутворювачем є каучук, відрізняються високою еластичністю і використовуються для склеювання гуми з гумою або гуми з металами та склом. Гумові клеї — це розчини каучуку або гумових сумішей в органічних розчинниках. До складу клеїв гарячої вулканізації входить *вулканізуючий агент*. Склеювання проводять при температурі вулканізації 140...150 °С. З'єднання стає міцним, не поступається міцністю основному матеріалу.

При введенні до складу клейової композиції *активаторів* і *прискорювачів* отримують самовулканізуючий клей (процес вулканізації проходить при нормальній температурі). Для збільшення адгезії в клей вводять синтетичні смоли (наприклад, клей 88Н). З'єднання виходить досить міцним. Недоліком клею 88Н є нестійкість плівки до гасу, бензину і мінеральних мастил. Клеї 9М-35Ф, ФЕН-1 мають високу здатність до склеювання і стійкість щодо впливу мастил і палива.

При з'єднанні теплостійких гум на основі кремнійорганічного каучуку з металом застосовують клеї, до складу яких входять кремнійорганічні смоли (клей КТ-15, КТ-30). Такі сполуки здатні працювати при температурах від – 60 до 200...300 °С.

Порівняльні характеристики смоляних та гумових клеїв наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Марка клею	Режим склеювання			Температура експлуатації клейового з'єднання, °С	Призначення
	Тиск, МПа	Температура, °С	Час, год		
БФ-2, БФ-4	0,1...0,2	До 150	1	– 60...60	Склеювання металів, сплавів, кераміки, скла, дерева, шкіри, текстоліту, органічного скла
Клей 88Н	—	10...15	До 48	– 60...60	Склеювання холодним способом вулканізованої гуми з металом, шкірою, деревом, склом
ПЕД-Б	0,1...0,2	20...40	До 48	– 40...60	Склеювання вініпласту, полівінілхлориду, металу та дерева
К-153	До 0,05	20...30	До 48	– 30...60	Склеювання металу, скла, полівінілхлориду
ВК-3, ВК-4	До 2,0	До 70	1	– 60...180	Склеювання сталі, титану, алюмінію, склотекстоліту

§ 8.4

Лакофарбові матеріали

Лакофарбові покриття використовують для захисту конструкцій та матеріалів від впливу атмосферної корозії та надання виробу товарного вигляду. Розрізняють такі види лакофарбових матеріалів:

- олійні фарби; • емалеві; • порошкові; • лаки.

Олійні фарби — це суспензії, виготовлені ретельним розтиранням мінеральних або органічних пігментів в оліях, які слугують плівкоутворюючою речовиною. Пігменти додають фарбі відповідного кольору. Ними є оксид цинку, свинцеві білила, вохра і т. д.

Рослинні олії варять із добавкою пластифікаторів та сикативів. Отриману олію називають оліфою. Як пластифікатори застосовують рицинову олію, дібутилфталат та діоктилфталат. Речовини, які застосовуються для прискорення процесу твердіння плівок, називають *сикативами* (солі свинцю, кобальту, марганцю, цинку, кальцію та ін.). Для підвищення тривкості й стійкості шару фарби до складу додають наповнювачі (тальк, каолін).

Емалеві фарби (або емалі) — це розчини лаків в органічних розчинниках із добавкою пігментів. Подібно лакам емалі дають блискучі плівки і можуть утворювати теплостійкі і корозійностійкі покриття. Емалеві фарби дешевше лаків. Залежно від зв'язуючої речовини розрізняють такі види емалевих фарб: масляні (на масляних лаках), гліфталеві (на гліфталевих лаках) і нітроемалі (на нітроцелюлозних лаках). Нітроемалі — це матеріали, що швидко висихають та тверднуть вже через кілька хвилин після нанесення на поверхню. Їх недоліки — легка займистість, невисокі теплостійкість і стійкість до дії ультрафіолетових променів.

Порошкові фарби — це тверді порошкоподібні композиції на основі епоксидних, поліефірних та інших смол, які використовують для отримання захисних та декоративних покриттів. Порошкові фарби мають певні переваги над іншими видами лакофарбових матеріалів, а саме: стабільність щодо властивостей, екологічної безпеки, малої трудомісткості при нанесенні. Такі фарби наносять електростатичним напыленням та сушать при 180...200 °С протягом 20...30 хв.

Лаки — це розчини природних або синтетичних смол у різних розчинниках. За типом розчинників розрізняють *спиртові* і *масляні* лаки. Перші являють собою розчин смоли в спирті (КФ-274, МФ-15, ГФ-13, МА-22), другі — в оліфі (БТ-100, БТ-99, БТ-177 та інші). Після нанесення лаку на поверхню виробу розчинник (ацетон) звітрюється і на ній утворюється міцна плівка.

Переваги лаків порівняно з фарбами полягають в утворенні більш блискучих поверхонь та прискоренні процесу сушіння. Плівки лаків, виготовлених на основі штучних смол, витримують високі температури, вплив лугів і кислот. Недолік багатьох лаків — слабка адгезія до металів, крихкість захисної плівки.

Технологічний процес нанесення лакофарбових матеріалів включає підготовчі операції, а саме: фарбування та сушіння. Безпосередньо перед фарбуванням наноситься *грунтувальний шар* (15...20 мкм) для поліпшення зчеплення фарби з металевою поверхнею та зниження шпаристості лакофарбового покриття. Для чорних металів застосовується гліфталева ГФ-220 і пентафталева ПФ-020, ПФ-033, ПФ-099 ґрунтовки.

Рамні конструкції та корпуси різних машин фарбують пентафталевими ПФ-133, алкідно-акриловими АС-182 та етрифталевими ЕТ-199 емалями. При фарбуванні кабін, крил і лицювальних частин машин та агрегатів застосовують нітроемалі НЦ різних марок.

Деталі, що піддаються впливу високих температур (блоки двигунів, головки, колектори та інші), покриваються лаками з добавками алюмінієвої пудри.

Найпоширеніший спосіб нанесення захисних покриттів — це фарбування розпиленням, яке здійснюється через сопло пістолета з використанням стиснутого повітря. Тиск повітря в системі становить 3...5 атм. Даний спосіб є продуктивним і використовується для виробів будь-яких габаритів.

Після фарбування виріб піддається природному або штучному сушінню. Для скорочення тривалості процесу застосовують штучне сушіння в спеціальних камерах. Вибір способу, тривалості та температури сушіння залежать від характеру та об'єму виробництва, розмірів оброблюваних поверхонь та властивостей лакофарбових матеріалів.

§ 8.5

Деревина

Деревина використовується як конструкційний матеріал в різних галузях промисловості як в натуральному вигляді, так і у вигляді різноманітних деревних матеріалів. Деревина складається з органічних речовин: 43...45 % целюлози ($C_6H_{10}O_5$), 19...29 % лігніну, низькомолекулярних вуглеводів та інших компонентів.

Перевагами деревини як конструкційного матеріалу є достатньо висока механічна міцність і невелика об'ємна маса і, отже, висока питома міцність, високий опір ударним і вібраційним навантаженням. Теплофізичні властивості деревини характеризуються малою теплопровідністю і в 20 разів меншим, ніж у сталі, температурним коефіцієнтом лінійного розширення. Деревина має високу хімічну стійкість до деяких кислот, солей, мастил, газів. Важливими властивостями деревини є її здатність до склеювання, можливість швидкого з'єднання цвяхами, шурупами, легкість механічної обробки і гнуття.

Поруч із вказаними перевагами деревина має ряд недоліків, що обмежують її застосування як конструкційного матеріалу, а саме: гігроскопічність, яка є причиною відсутності у деталей з деревних матеріалів стабільності форми, розмірів і міцності, що змінюються зі зміною вологості; схильність до ураження грибковими захворюваннями; відсутність вогнестійкості; низький модуль пружності; анізотропія механічних властивостей, які внаслідок волокнистої будови деревини неоднакові в різних напрямках дії сил; неоднорідність будови, внаслідок чого властивості матеріалу різні не тільки в межах однієї породи, але й одного стовбура.

Фізичні властивості. Для деревини як конструкційного матеріалу основне значення мають вологість, зміна розмірів і форми, питома вага.

Вологістю деревини називається кількість води, що знаходиться в ній, виражена у відсотках. Усі властивості деревини для порівняння визначають при стандартній вологості 15 %. Виробнича вологість повинна дорівнювати експлуатаційній або бути нижчою на 2 %, інакше деревина всихатиме.

За умов експлуатації або зберігання деревини на відкритому повітрі її вологість може значно збільшуватися і спричиняти загнивання дерев'яних елементів. Для боротьби з цим недоліком застосовують гідроізоляційні прокладки, лакофарбові покриття і антисептичну обробку.

Зміна розмірів і форми деревини пов'язана зі зміною її вологості. Ці зміни виражаються в усиханні, розбуханні і викривленні. При висиханні деревини з неї спочатку видаляється вільна волога, при цьому розміри клітин не змінюються (зменшується тільки маса); з моменту точки насичення стінки волокон деревини втрачають вологу і скорочуються в розмірах.

Деревина різних порід дерев має однаковий хімічний склад, тому густина речовини, що утворює стінки клітин, дорівнює $1,54 \text{ г/см}^3$. Важливо знати також *питому вагу* γ , яка залежить від вологості

матеріалу та коефіцієнта об'ємного усихання. Значення γ для деревини становить $0,34...0,98 \text{ г/см}^3$. Чим більша питома вага, тим щільніша деревина і тим краще вона чинить опір навантаженням. М'якими породами є сосна, ялина, ялиця, липа, осика, вільха; надтвердими — граб, дуб, груша, самшит.

Механічні властивості деревини. Механічні властивості деревини залежать від вологості й інших факторів. Так, міцність деревини залежить від швидкості навантаження: чим повільніше прикладається навантаження, тим менше величина границі міцності. З часом опір деревини поступово зменшується і досягає певної межі довготривалого опору, при якій дерев'яна деталь може працювати невизначено довгий час. При ударних навантаженнях опір ударному згину в'язких порід (ясена, дуба) в $1,5...3$ рази вищий, ніж крихких хвойних порід (сосни, ялини, ялиці).

Різновиди деревних матеріалів. Матеріали з натуральної деревини застосовують у вигляді пиломатеріалів і заготовок. Пиломатеріали хвойних порід застосовують більш широко, оскільки вони мають високу міцність, менш схильні до загнивання, особливо сосна. З листяних порід дуб і ясен добре піддаються гнуттю; бук і береза слугують їх заміниками.

Хвойні й тверді листяні породи застосовують для силових ненавантажених деталей. М'які породи (липа) є несиловими матеріалами. Хвойні пиломатеріали використовують в суднобудуванні, в автомобілебудуванні (деталі вантажних автомобілів), в конструкціях вантажних залізничних вагонів, сільськогосподарських машин тощо.

Шпон — це широка рівна стружка деревини, яку отримують шляхом лушення або стругання. Товщина листів шпону — від $0,55$ до $1,5$ мм. Шпон є напівфабрикатом для виготовлення фанери, деревних шаруватих пластиків і гнутих деталей. Шпон з красивою текстурою (дуб, бук) використовується як облицювальний матеріал для виробів з деревини.

Фанера — це листовий матеріал, який отримують шляхом склеювання шарів шпону. Товщина фанери — від 1 до 12 мм. Залежно від клею, яким склеюють шпон, і водостійкості, фанеру випускають таких марок: ФСФ на фенолоформальдегідному клеї з підвищеною водостійкістю, ФК на карбамідному і ФБА на альбуміноказеїновому клеї з середньою водостійкістю та ФБ на білкових клеях з обмеженою водостійкістю.

Пресовану деревину отримують при гарячому пресуванні брусків, дошок, заготовок, при цьому її піддають спеціальній термообробці в

ущільненому стані. Пресована деревина має такі властивості: питому вагу $1,1...1,42 \text{ г/см}^3$, порог міцності вздовж волокон при розтягуванні $1,4...2,3 \text{ МПа}$, при стискуванні — $0,9...1,3 \text{ МПа}$, при згині — $1,5...2,0 \text{ МПа}$.

Пресована деревина є заміником чорних, кольорових металів і пластмас. У машинобудуванні для виготовлення деталей машин, що працюють при ударних навантаженнях (кулачки, сегменти зубчастих передач, підшипники, втулки), широко використовують такі марки пресованої деревини: ДПО-П, ДПД-П, ДПК-П, ДПГ-ППр. Вкладиші з деревини порівняно з бронзовими мають вдвоє менший знос, при цьому знижується витрата мастил.

Деревостружкові плити виготовляють гарячим пресуванням деревної стружки зі зв'язуючою речовиною. Плити випускають одношарові (ПС-1, ПТ-1), тришарові (ПС-3, ПТ-3) та облицьовані шпоном, фанерою, папером (ЕС, ЕМ).

Деревостружкові плити легкі, мають об'ємну масу $0,35...0,45 \text{ г/см}^3$, мають теплоізоляційні властивості. Для важких і надважких плит питома вага досягає $0,75...1,1 \text{ г/см}^3$. Деревиностружкові плити застосовують для виготовлення підлоги і бортів вантажних машин і причепів, у вагонобудуванні, в будівництві, для виробництва меблів.

Деревоволокнисті плити виготовляють з деревних волокон (роздробленої деревини), іноді з добавками зв'язуючих речовин. Під дією високої температури і великого тиску волокна спресовуються в рівномірно міцний матеріал. Плити поділяють на м'які пористі (М-4, М-12, М-20), напівтверді (ПТ-100), тверді (Т-350, Т-400) і надтверді (СТ-500). У позначенні марки плит цифри означають σ_b , кгс/см^2 . Деревоволокнисті плити застосовують для оздоблення пасажирських вагонів, внутрішньої обробки автобусів, в радіотехнічній промисловості та будівництві.

§ 8.6

Неорганічне скло

Неорганічне скло — це затверділий розчин, що є складним розплавом кислотних і основних оксидів високої в'язкості. Склоподібний стан є різновидом аморфного стану речовини. При переході з розплавленого рідкого стану в твердий аморфний в процесі швид-

кого охолодження і наростання в'язкості структура наче "заморожується". У зв'язку з цим неорганічне скло характеризується не-впорядкованістю і неоднорідністю внутрішньої будови.

До складу неорганічного скла входять склоутворюючі оксиди кремнію, бору, фосфору, германію, миш'яку. Крім того, до складу скла вводять оксиди алюмінію, заліза, свинцю, титану, берилію, які надають склу потрібних технічних характеристик. У зв'язку з цим промислове скло є складною багатокомпонентною системою.

За призначенням все скло поділяють на:

- *технічне* (оптичне, світлотехнічне, хіміко-лабораторне, приладове, трубне);
- *будівельне* (віконне, вітринне, армоване, склоблоки);
- *побутове* (склотара, посуд, побутові дзеркала).

Скло випускається промисловістю у вигляді готових виробів, заготовок або окремих деталей.

При нагріванні скло плавиться в певному температурному інтервалі, який залежить від хімічного складу скла. Температура, нижче якої скло стає крихким, називається *температурою склування* (t_c). Для промислового силікатного скла температура склування $t_c = 425...600$ °С, температура розм'якшення (t_p) знаходиться в межах $600...800$ °С. В інтервалі температур між t_c і t_p скло знаходиться у високов'язкому пластичному стані.

При температурах розм'якшення $1000...1100$ °С проводяться всі технологічні процеси переробки скломаси у виробі.

Найважливішими специфічними властивостями скла є його *оптичні властивості*, а саме:

- прозорість;
- віддзеркалення;
- розсіювання;
- поглинання;
- преломлення світла.

Звичайне незабарвлене скло пропускає до 90 %, віддзеркалює приблизно 8 % і поглинає близько 1 % видимого і частково інфрачервоного світла; ультрафіолетові промені поглинає майже повністю. Кварцове скло є прозорим для ультрафіолетових променів. Коефіцієнт заломлення скла становить $1,47...1,96$; коефіцієнт розсіювання (дисперсії) — $20...71$. Скло з великим вмістом оксиду свинцю поглинає рентгенівські промені.

Термостійкість скла характеризує його довговічність за умов різних змін температури. Вона визначається різницею температур, яку скло може витримувати без руйнування при його різкому охолодженні у воді (0 °C). Для більшості видів скла термостійкість коливається від 90 до 170 °C, а для кварцового скла вона становить 800...1000 °C.

Хімічна стійкість скла залежить від компонентів, що входять до його складу: оксиди SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , ZnO забезпечують високу хімічну стійкість, а оксиди Li_2O_3 , Na_2O_3 , K_2O і PbO навпаки, сприяють хімічній корозії скла.

Механічна міцність і термостійкість скла можуть бути підвищені шляхом гартування.

Гартування полягає в нагріві скла до температури вище t_c і подальшому швидкому і рівномірному охолодженні в потоці повітря або в маслі. При цьому опір статичним навантаженням збільшується в 3...6 разів, ударна в'язкість — у 5...7 разів. При гартуванні підвищується також термостійкість скла.

Використання технічного скла. В транспортних засобах використовують переважно триплекси, термопан і загартоване скло.

Силікатні триплекси — це два листи загартованого скла (завтовшки 2...3 мм), склеєні прозорою, еластичною полімерною плівкою. При руйнуванні триплексу негострі уламки, що утворилися, утримуються на полімерній плівці. Триплекси бувають плоскими і гнучими.

Термопан — це тришарове скло, що складається із двох шарів скла і повітряного проміжку між ними. Цей повітряний прошарок забезпечує теплоізоляцію.

Оптичне скло використовують в оптичних приладах та інструментах. Воно буває двох видів: з малим коефіцієнтом преломлення (крони), і з високим вмістом оксиду свинцю і великими значеннями коефіцієнта переломлення (флінти). Важкі флінти не пропускають рентгенівські та γ -промені. Світлорозсіююче скло містить фтор.

Для скління кабін і приміщень, де знаходяться пульти управління мартенівських і електричних дугових печей, прокатних станів і підймальних кранів в ливарних цехах, використовується скло, що містить оксиди заліза і ванадію, які поглинають близько 70 % інфрачервоного випромінювання в інтервалі довжин хвиль 0,7...3 мкм.

Кварцове скло завдяки високій термічній і хімічній стійкості застосовують для тиглів, чаш, труб, наконечників, лабораторного посуду.

Скловата є різновидом скловолокнистих матеріалів. Застосування її обмежене крихкістю; матеріали АСИМ, АТМ-3 складаються зі скловолокна, розташованого між двома шарами склотканини або склосітки. Використовують ці матеріали в інтервалі температур від – 60 до 450...600 °С.

Скловату застосовують для теплозвукоізоляції кабін літаків, кузовів автомашин, залізничних вагонів, тепловозів, електровозів, корпусів суден, у холодильній техніці для ізоляції трубопроводів, автоклавів тощо.

Контрольні запитання

1. З яких компонентів виготовляють пластмаси?
2. Яка відмінність фізико-механічних властивостей термопластичних і термореактивних пластмас?
3. У чому полягає процес старіння пластмас і чим це викликано?
4. Що складає основу термопластичних і термореактивних пластмас?
5. Що таке гума та з яких компонентів вона складається?
6. Які компоненти входять до складу клеючих матеріалів?
7. Як класифікують скло за призначенням?
8. Наведіть приклади використання технічного скла.
9. Які є різновиди деревних матеріалів?

Технологія ВИГОТОВЛЕННЯ виробів



ISSN 0013-788X

Глава 9

Технологія ливарного виробництва

§ 9.1

Сутність ливарного виробництва і ливарні властивості сплавів

Ливарним виробництвом називається процес одержання фасонних деталей заливкою розплавленого металу в форми. Форма заповнюється металом через систему каналів, яка називається *ливниковою системою*. При цьому зовнішні контури виливки (відливки) визначаються порожниною форми, а внутрішні — утворюються фасонними вставками, які називаються *стрижнями*. Форми, які використовують для одержання однієї виливки, називаються *одноразовими*, а для одержання сотень і тисяч виливків — *постійними* (багаторазовими). Одноразові форми руйнуються при видаленні із них виливок. Постійні форми найчастіше виготовляють із металу і вони не руйнуються при видаленні виливка. Така металева форма називається *кокілем*. Напівпостійні форми виготовляються із високовогнетривких матеріалів і використовуються десятки разів. Одноразові форми виготовляють з піщано-глинистих, піщано-смоляних та піщано-керамічних сумішей. Вони можуть виконуватись об'ємними (великі завтовшки) або оболонковими (малі завтовшки). Найпоширеніші — піщано-глинисті. В одиничному виробництві виготовлення виливок в піщано-глинистих формах є найпростішим і дешевим способом. Проте виливки, одержані в таких формах, мають низьку точність, потребують завищених припусків на механічну обробку, а технологія їхнього виготовлення пов'язана з переробкою значної кількості формуючих матеріалів, що погіршує умови праці та ускладнює автоматизацію технологічного процесу. При використанні будь-яких форм складання технологічної карти виготовлення виливки почина-

ється з розробки креслення деталі з урахуванням властивостей сплаву. Крім механічних, фізичних і хімічних властивостей, ливарні сплави повинні мати визначені (і враховані в першу чергу) технологічні ливарні властивості, основними з яких є:

- рідкотекучість;
- ліквация домішок;
- газопоглинання;
- об'ємна та лінійна усадки.

Під *рідкотекучістю* розуміють здатність сплаву при заливці відтворювати рельєф порожнини форми. При недостатній товщині стінок відливки чи низькій рідкотекучості сплаву форма заповнюється не повністю, деталь виходить з “недоливом” і бракується. Рідкотекучість визначається за особливою технологічною пробою шляхом заливки форми у вигляді спіралі перерізом $0,56 \text{ см}^2$ та позначками через кожні 50 мм довжини. Довжина заповненої сплавом спіралі є характеристикою рідкотекучості досліджуваного сплаву. Рідкотекучість залежить від типу сплаву та температури заливки металу: чим вище температура заливки, тим більша рідкотекучість сплаву. Добра рідкотекучість у чавуна, силуміна (сплав алюмінію та кремнію), олов'яної бронзи. При добавці фосфору рідкотекучість чавуну і бронзи зростає ще більше. Вміст у чавуні від 0,5 до 1,5 % фосфору дає змогу відливати тонкостінні опалювальні радіатори, поршневі кільця та інші тонкостінні деталі. Із бронзи з 1 % фосфору одержують художні відливки скульптур, барельєфів, тонкостінних ґрат. Тугоплавкі компоненти (вольфрам, титан, молібден, ванадій) знижують рідкотекучість сплаву.

Під *ліквациєю* розуміють неоднорідність сплаву за хімічним складом в різних частинах перерізу відливки після кристалізації металу. Ліквация залежить від хімічного складу сплаву та швидкості охолодження відливки. Причиною ліквации є направлена кристалізація сплаву від поверхні до центру стінки відливки. В першу чергу кристалізуються тугоплавкі компоненти сплаву і їхні зростаючі кристали відтісняють легкоплавкі компоненти від периферії до центру. Найінтенсивніше ліквірують шкідливі домішки — сірка і фосфор. Чим крупніша відливка і повільніше її охолодження, тим сильніше розвивається зональна ліквация, яка призводить до погіршення механічних властивостей частин відливки, що тверднуть в останню чергу. З утворенням ліквации можна боротися або прискореним охолодженням відливок у формі, або раціонально конструюючи їх, коли за рахунок направленого тверднення можна більшу частину ліквіруючих домішок вивести в надлив.

Під *газопоглинанням*, або *схильністю до поглинання газів*, розуміють здатність металу в рідкому стані розчиняти в собі гази. При охолодженні сплаву і в процесі його кристалізації розчинність газів (азоту, водню та інших) зменшується. Якщо газопроникність форми і стрижнів недостатні, то в тілі відливки можуть створюватися газові раковини і пори. Розчинність газів у рідкому металі зростає з підвищенням температури, тому перед заливкою метал не бажано перегрівати. Для зменшення газонасиченості сплавів застосовують плавку в вакуумі або в середовищі інертних газів.

Під *усадкою* розуміють властивість сплаву зменшуватись в об'ємі (*об'ємна усадка*) та лінійних розмірах (*лінійна усадка*) при затвердненні та охолодженні. Усадка виражається в процентах (%) та залежить від хімічного складу сплаву і температури виливки. З підвищенням температури виливки сплаву усадка її збільшується.

Об'ємна усадка металу спричинена зменшенням об'єму металу відливки в процесі кристалізації, оскільки в рідкому стані метал займає більший об'єм, ніж у твердому з щільним упакуванням атомів в кристалічній ґратці. Затверднення металу в кожному перерізі відливки проходить пошарово від периферії до центру. В результаті цього всередині перерізу відливки, де метал кристалізується в останню чергу, створюється концентрована раковина або розподілена пористість. Такі дефекти приводять до локальної концентрації механічних напружень, знижують міцність і тріщиностійкість відливки. Найбільш небезпечними дефектами є усадочні раковини. Для боротьби з концентрованими усадочними раковинами застосовуються такі методи: • конструювання рівностінних відливок; • установка холодильників; • установка надливів. У рівностінній відливці кристалізація завершується одночасно по всьому перерізу, а тому недостає металу в центральних перерізах відливки створює не усадочну раковину, а усадочну пористість. Якщо відливка має стовщення, то, встановивши холодильники, можна штучно створити одночасне затверднення металу в місцях його накопичення й уникнути утворення раковин, але не пористості. Як холодильник для сплавів з невисокою температурою плавлення використовують чавунні або сталеві бруски, збільшуючи з їх допомогою за рахунок тепловіддачі швидкість охолодження потовщеного перерізу і наближаючи її до швидкості тонких перерізів.

Для одержання відливку без пористості зі сплаву з підвищеною об'ємною усадкою необхідно забезпечити направлене затверднення металу знизу вгору, а в верхній частині відливки створити додаткову порожнину — надлив. У цьому випадку нижні частини відливки в процесі кристалізації будуть насичуватись за рахунок рідкого металу,

що лежить вище, тобто на завершувальній стадії — за рахунок металу надлива, який має найбільший переріз. Концентрована усадочна раковина в такій відливці створюється в надливі, який потім відрізають від відливки.

Ливарні сплави мають різну об'ємну усадку. Найбільшу усадку мають алюмінієві бронзи (7,2...7,4 %), латуні (5,7...6,1 %) та вуглецева сталь (5...6 %). Об'ємна усадка сірого чавуну невелика (2,9...3,1 %), тому при одержанні деталей виливанням із чавуну надливи встановлюють тільки для великих відливок.

Крім об'ємної усадки, необхідно враховувати і лінійну усадку. Під *лінійною* усадкою розуміють властивість сплавів зменшувати лінійні розміри відливки в процесі її охолодження після кристалізації до нормальної температури. Розрізняють *вільну* та *утруднену* усадку металу. Якщо метал затвердів у ливарній формі, яка буде перешкоджати усадці (відливка має виступи, фланці, отвори, створені стрижнями тощо), то така усадка буде утрудненою і її називають *ливарною усадкою*. Якщо відливка має просту конфігурацію (без виступів, фланців, отворів) і ливарна форма не перешкоджає усадці відливки, то така усадка буде вільною і її називають *лінійною усадкою*.

Ливарна усадка часто спричиняє великі технологічні труднощі, оскільки при гальмуванні усадки в відливці виникають напруження, що призводять до її покороблення і утворення тріщин. Для подолання цих труднощів необхідно застосовувати деякі технологічні прийоми. Наприклад, у шківках, маховиках спиці роблять під нахилом до ободу, або навіть викривленими, що зменшує внутрішні напруження в спицях і при затвердненні вони здатні випрямлятись. Для попередження створення тріщин при перебігах від товстої стінки до тонкої передбачають плавні переходи. Для зменшення жолоблення передбачають ребра жорсткості. Кромки стінок з великою поверхнею потовщують буртиком. Для визначення утрудненої ливарної усадки відливають пробу з виступами, а вільну лінійну усадку визначають за допомогою проби у вигляді призматичного стрижня без виступів.

Лінійна усадка для різних ливарних сплавів різна. Так, лінійна усадка сірого чавуну найменша і становить в середньому 1 %, вуглецевої сталі — 2 %, деяких легованих сталей — більше 2 %, кольорових сплавів — 1,2...2 %. При виготовленні моделей відливок обов'язково враховують лінійну усадку сплаву.

§ 9.2

Вимоги щодо виготовлення моделей і виливків

При виконанні креслень деталі наносяться вказівки по виготовленню моделі, а саме:

- припуски на механічну обробку;
- технологічні вказівки по виготовленню відливки;
- розпізнавальні дані і спеціальні вимоги до відливок.

Припуск на механічну обробку — це додатковий шар металу, який видаляють в процесі механічної обробки відливки для забезпечення точності та високої якості поверхні деталі. Припуск на механічну обробку визначають з урахуванням жолоблення, неточності виготовлення, а також ливарної усадки відливки. На кресленні такий припуск звичайно зображують суцільною тонкою лінією. Величину припуску на механічну обробку вказують цифрою перед знаком шорсткості поверхні деталі або величиною уклону і лінійними розмірами деталі.

Технологічний припуск спрощує і полегшує процес виготовлення відливки. Технологічний припуск вказують цифрою зі знаком плюс чи мінус та буквою Т (технологічний припуск) і представляють його на продовження розмірної лінії, або на поліці лінії — виноска, якщо не можна розмістити напис і цифру на продовженні розмірної лінії. До технологічних припусків відносять: • ливарні уклони; • напуски; • надливи; • усадочні ребра або стяжки; • галтелі.

Ливарні уклони на виливки слугують для зручного звільнення моделей із форми без руйнування її або для вільного видалення стрижня зі стрижневого ящика. Вони виконуються в напрямку видалення (звільнення) моделі із форми. Позначають їх у міліметрах (мм) або градусах. Залежно від висоти моделі уклон становить 1...8 мм, або 0,5...3°.

Напуск слугує для спрощення виготовлення відливки. Наприклад, отвір діаметром 20...50 мм можна не робити, оскільки його легше просвердлити, якщо передбачено відповідний напуск металу. Напуск на верхній горизонтальній частині відливки (завищений припуск) служить для видалення при механічній обробці дефектів — підкоркових газових і шлакових раковин, які при заливці спливають на верхню горизонтальну поверхню відливки.

Надливи застосовують для зручності кріплення відливки в пристрої при механічній обробці, а також для захвата деталі під час транспортування.

Ребра, або стяжки, передбачають для запобігання відливки від жолоблення не тільки під час затверднення та охолодження, а й при термообробці.

Галтелі — це закруглення внутрішнього кута відливки і моделі. Вони необхідні для одержання плавного переходу в сполучених стінках. За допомогою галтелей виключається осипання формуючих сумішей в кутах моделі при її вивільненні із форми. Радіуси галтелей регламентуються Держстандартом і становлять, звичайно, від 1/5 до 1/3 від середньоарифметичної товщини стінок відливки.

До технологічних вказівок відносять:

- лінії розняття моделі з зазначенням верхнього і нижнього її розташування в формі;
- лінію рознімання стрижня;
- положення і розміри стрижневих знаків;
- місце підвода живильника в формі;
- розташування базової поверхні для розмітки;
- точність і шорсткість поверхні, які допускаються технічними умовами.

Розпізнавальні знаки — це необхідні розміри, марка сплаву, місце клеймування тощо. Їх наносять на креслення відливки або біля креслення. На цьому самому кресленні наносять і спеціальні дані (вимоги).

Спеціальні дані — це технічні умови на прийняття, твердість і структуру окремих ділянок відливки, вказівки щодо випробувань (досліджень).

§ 9.3

Технологія виготовлення виливків у разових ливарних формах

Технологія виготовлення виливків в одноразових ливарних формах складається з такої послідовності технологічних операцій:

- виготовлення модельного комплекту;
- приготування формуючих і стрижневих сумішей;
- виготовлення форм і стрижнів;
- сушка стрижнів (іноді і форм);

- складання форм;
- одержання рідкого металу;
- заливка форм металом;
- вибивка виливків із форм;
- обрубка та очистка лиття;
- термообробка виливків (іноді);
- контроль готових виливків.

Модельний комплект — це комплект формуючих пристроїв, необхідних для створення при формовці робочої порожнини ливарної форми. Комплект складається з ливарної моделі стрижневих ящиків, моделі ливникової системи, формуючих, контрольних та складальних шаблонів для конкретної відливки.

Ливарна модель є зразком, за допомогою якого одержують зовнішні контури відливки в формі. Конструкція моделі має забезпечити вивільнення її з форм без порушення одержуваного відбитка,

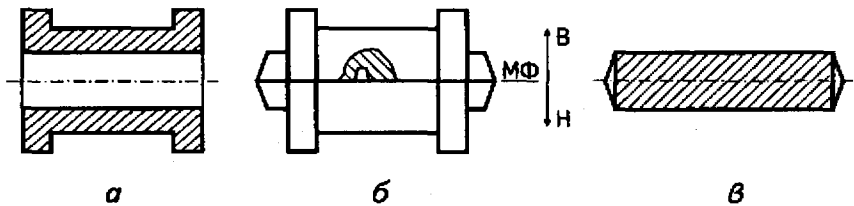


Рис. 9.1

Модельний комплект:

а — відливок; б — модель роз'ємна; в — стрижень

вона може бути щільною або роз'ємною. Поверхня моделі повинна бути гладкою і чистою, щоб легко відділятися від формуючої суміші. В одиничному виробництві в більшості випадків моделі виготовляють із деревини, а в масовому — з алюмінієвих сплавів, чавуну, пластмаси. В процесі їх виготовлення модельники враховують лінійну усадку сплаву і тому користуються спеціальним усадочним метром, ціна поділки якого дещо збільшена, наприклад, на 1 % або 2 % відповідно для чавунних та сталевих відливок.

У вигляді прикладу на рис. 9.1 наведено відповідно креслення ливарної деталі, роз'ємної моделі та ливарного стрижня, необхідного для одержання отвору в виливку.

Ливарний стрижень — це елемент ливарної форми, який використовується для одержання у виливку отвору, порожнини або іншо-

го складного контуру. Для одержання ливарних стрижнів використовують роз'ємні стрижневі ящики.

Модель ливникової системи (рис. 9.2) складається з ливникової чаші 1, ливника (стояка) 2, шлаковловлювача трапецієподібної форми 3, живильників 4, а також випару (на рисунку не вказаний) для виходу повітря з форми (або з так званої бобишки при заливанні сплавів з великою усадкою).

Під час заливки при поворотах і втраті швидкості руху металу у шлаковловлювачі шлак випливає на поверхню. Для зменшення ймовірності одержання у відливці шлакових земляних та газових раковин, недоливів, жолоблення окремих елементів деталі, засмоктування повітря та шлаку в форму необхідно ливникову систему заповнити рідким металом протягом усього часу заливки форми, а також додержуватись наступних умов: $S_{\text{жив}} < S_{\text{шл}} < S_{\text{ст}}$, де $S_{\text{жив}}$ — площа

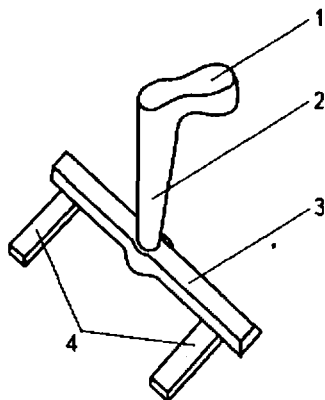


Рис. 9.2
Модель ливникової системи

сумарного перерізу всіх живильників; $S_{\text{шл}}$; $S_{\text{ст}}$ — відповідно площа перерізу шлаковловлювача та стояка.

Моделі звичайно монтують на металевих плитах, які називаються *модельними плитами*. Ці плити не тільки формують площину рознімання ливарної форми, несуть на собі різні частини моделі відливки та моделі ливникової системи, але й слугують для набивання формуючою сумішшю одної з парних опоки при використанні нероз'ємних моделей. Опоки являють собою порожні рамки, звичайно круглого або прямокутного перерізу. Призначені вони для утримання формуючої суміші при виготовленні ливарної форми, її транспортуванні та заливці рідким металом. Виготовляють опоки зі сталі, чавуну, алюмінію, а іноді — з дерева. Вони повинні бути легкими, міцними і добре утримувати ущільнену формуючу суміш.

При формовці за роз'ємною моделлю використовують парні опоки, які центруються за допомогою спеціальних проушин та напрямних стрижнів, забезпечуючи повний збіг контурів відливки верхньої та нижньої напівформ.

Формуючий інструмент, застосований при виготовленні одноразових ливарних форм, підрозділяють на дві групи: формуючий та обробний. До першої відносять формуючий інструмент, що слугує для наповнення та ущільнення формуючої суміші в опоках. До нього відносяться лопати, ручні та пневматичні трамбівки, піскомет тощо. Наколювання вентиляційних каналів у формі роблять сталевими голками (душниками). До другої групи відноситься інструмент, який застосовується для звільнення моделі з форми та обробки поверхні форми. Це різновидності гачків, підйомників, гладилок, ложечок, ползків, пульверизаторів тощо.

Формуючі і стрижневі суміші, що використовуються в ливарному виробництві, складаються з кварцового піску, глини і зв'язуючих матеріалів. Ці суміші повинні мати добру пластичність, текучість, газопровідність, міцність та протипригарність. *Пластичність* забезпечує одержання в формі чіткого відбитка моделі. *Текучість* — це здатність суміші заповнювати порожнину під дією зовнішніх сил або обтікати модель і рівномірно ущільнюватися коло неї. *Газопровідність* — це здатність форми і стрижня пропускати гази, які виділяються з формуючої та стрижневої суміші, і не допускати створення в металі газових раковин. *Міцність* — це здатність форми та суміші витримувати вплив навантаження, не руйнуючись при виготовленні, транспортуванні та дії рідкого металу. Для збільшення міцності сумішей до них додають зв'язуючі матеріали, рідке скло, синтетичні смоли тощо. *Протипригарність* — це здатність сумішей і форми не спікатися і не сплавлятися з розплавленим металом. Через пригоряння сумішей до відливки на її поверхні створюється суцільна кірка із суміші оксидів металу та піску, яка утруднює наступну механічну обробку. Для зменшення шкідливого ефекту в суміш додають протипригарні добавки: кам'яне вугілля для чавунних відливок, мазут для бронзи. Форми та стрижні покривають *фарбою* та припилом. До складу фарби входять:

- вогнетривка глина;
- графіт;
- кварцовий пісок;
- зв'язуючі.

Як припил застосовують порошковий графіт, молоте деревне вугілля та інше. Як зв'язуючі суміші використовують синтетичні та натуральні смоли, полівініловий спирт, продукти переробки крохм-

лю та відходи спиртового виробництва. Моделі фарбують: для чавуну — червоною, для сталі — синьою, для кольорових металів — жовтою фарбою, а стрижневі знаки — чорною фарбою. За способом застосування формуючі суміші розділяють на:

- облицювальні;
- наповнювальні;
- єдині.

Облицювальна суміш (формуюча або стрижнева) слугує для виготовлення робочого шару форми або стрижня з завищеною газопроникністю та завтовшки 40...100 мм. *Наповнювальна суміш* використовується для заповнення форми та стрижня після нанесення облицювальної суміші. *Єдина суміш* використовується одночасно як облицювальна та наповнювальна. Формуючі та стрижневі суміші готують в спеціальних відділеннях. Сирий формуючий матеріал сушать, подрібнюють, просівають (те саме роблять з відпрацьованою сумішшю, проте її додатково очищають від пилу). Підготовлені матеріали у визначеній пропорції змішують у спеціальних змішувачах-бігунах.

Виготовлення ливарних форм та стрижнів здійснюють різними способами. В основному, залежно від розмірів та маси відливки, а також від типу виробництва (індивідуальне або масове) застосовуються такі методи формовки:

- в ґрунті;
- ручна формовка в опоках;
- машинна формовка в опоках.

Ливарні форми вручну в ґрунті виготовляють в індивідуальному виробництві переважно для великих відливок. Для деталей простої конфігурації з верхньою плоскою поверхнею застосовується відкрита ґрунтова формовка. В цьому випадку для великих важких відливок на дні виритої ями спочатку готують тверду постіль з рівного шару коксу, потім підводять труби для покращання відводу газів, далі укладають рівним шаром формуючу суміш і тільки після цього на підготовлену суміш кладуть модель і обережно її осаджують. Горизонтальність верхньої плоскості перевіряють рівнем. Потім вирізають ливникове заглиблення під чашу і від неї прорізають канал для виходу металу в форму. На протилежній стороні роблять такий самий канал з приямком для зливу з форми зайвого металу. Після цього модель виймають і обробляють лінії пошкодження, припилюють і заливають металом.

Закрита ґрунтова формовка застосовується для відливок, поверхню яких можна оформити обертанням шаблону навколо вертикаль-

ної осі, а також коли виготовлення моделі не економічне. *Шаблони* називається профільна дошка, що має контури внутрішньої або зовнішньої поверхні відливки. Такі шаблони почергово закріплюють на спеціальному рукаві, який ставлять на шпindel з підшипником. Після установки першого шаблону в яму насипають формуючу суміш (землю) і ущільнюють її. Шаблон повертають навколо осі шпинделя на 360°. Одержану поверхню посипають керамзитним піском, закривають папером, оформлюючи тим самим поверхню відливки. Після зняття цього шаблону ставлять опоку, фіксуючи механічно її положення, і набивають верхню напівформу. Опoку видаляють, ставлять другий шаблон і оформлюють нижню напівформу, знімаючи шар суміші на товщину стінки відливки, після чого шаблон разом зі шпинделем виймають з під'ятника, який залишається на дні ями, отвір від шпинделя забувають формуючою сумішшю, опoку з верхньою напівформою повертають на попереднє місце і порожнину створеної форми заливають металом.

Ручна формовка в опоках продуктивніша за формовку в ґрунті. Крім того, відливки при такій формовці більш точні.

Залежно від внутрішнього контуру, розмірів та складності відливок застосовують різні способи ручної формовки. Найчастіше застосовують формовку в двох опоках за нероз'ємною та роз'ємною моделлю. Послідовність технологічних операцій при формовці в двох опоках по нероз'ємній моделі така: модель ставлять на підмодельну дошку і засипають в опoку формуючу суміш, утрамбовують її і душником роблять наколи, не доходячи до моделі на 10...15 мм. Набиту опoку перевертають, накривають верхньою опoкою, в яку вставляють модель ливникової системи та випар, засипають її формуючою сумішшю й ущільнюють. Після цього опoки розбирають, видаляють всі моделі, форми підправляють, обдувають і припилюють, при необхідності ставлять стрижні. Перед заливкою металу за допомогою центруючих штирів, металічних скоб та інших пристроїв остаточно фіксують положення опок відносно одна одної.

Формовка в двох опоках по роз'ємній моделі проводиться аналогічно. Відмінність лише в тому, що спочатку на підмодельну дошку ставлять напівмодель плоскістю рознімання донизу. Після виготовлення нижньої напівформи опoку з напівмоделлю перевертають, на неї послідовно ставлять верхню частину моделі, модель ливникової системи і модель випару, завершуючи тим самим процес виготовлення верхньої напівформи. Потім знімають верхню опoку і видаляють частини моделі, вставляють стрижні і складають форму.

Якщо рознімання форми не плоске, а криволінійне, то можна застосувати формовку з підрізкою. В цьому випадку нерознімну модель заформовують у нижній опoці. Потім цю опoку перевертають

і підрізають плоскість розніму до частин моделі, які заважають вільному видаленню її з форми. Формовку верхньої напівформи, видалення елементів моделі та ливникової системи і наступне складання форми під заливку металом проводять як завжди.

Формовка по моделях з від'ємними частинами усуває необхідність підрізки. В цьому випадку від'ємні частини моделі кріпляться спеціальними шпильками, які видаляють з форми в процесі набивки

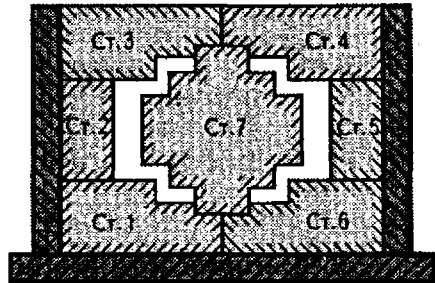


Рис. 9.3

Формовка в стрижнях

опоки формуючою сумішшю. Після видалення моделі і від'ємних частин форму остаточно обробляють і лише потім заливають металом. Для відливки дрібних деталей застосовують поверхневе та ступінчасте формування. Використання цих технологій дозволяє суттєво скоротити площу формуючої дільниці.

Для виготовлення в опоках тонкостінних відливок складної конфігурації або з великою кількістю ребер застосовують формовку в стрижнях (рис. 9.3). У цьому випадку всю форму з зовнішньої та внутрішньої сторін збирають зі спеціально виготовлених стрижнів, скріплених струбцинами, або скобами. Якщо комплект стрижнів розміщують не в опоки, а в жакети — чавунні ящики, то цей спосіб називають *жакетною формовкою*.

При машинній формовці застосовують струшуючі, пресові, пресострушуючі, піскометно-пресові та піскометні машини.

Струшуючі машини використовують для виготовлення форм у високих опоках, а пресові — для формування низьких опок по моделях, які не мають виступаючих частин. Для усунення нерівномірного ущільнення формуючої суміші застосовують профільні пресові колодки, що мають виступи, відповідні заглибленням на моделях.

Пресострушуючі машини ущільнюють суміш комбінованим способом — струшування з наступною підпресовкою, що забезпечує більш рівномірний розподіл щільності набивки форми по висоті.

Піскометно-пресові машини мають більш високу продуктивність, безшумні в роботі, забезпечують автоматичне дозування при запов-

ненні опоки. Цю технологію застосовують в основному для дрібних форм. Опока при цьому заповнюється за рахунок енергії стиснутого повітря сумішшю з піскометного резервуара, оснащеного знизу не тільки плитою з отворами для витоку суміші, але і щільним каналом для виходу повітря з опоки.

Піскометні машини стаціонарного або рухливого типу застосовуються для формовки великих опок. Основним вузлом таких машин є метальна головка, усередині якої обертається ківш. Суміш потрапляє в ківш зі стрічкового конвеєра крізь отвір задньої стінки, а викидається з великою швидкістю крізь вихідний отвір метальної головки, яка може встановлюватися у будь-якому положенні відносно опоки.

Виготовлення стрижнів здійснюють вручну та машинним способом. При ручному способі стрижні виготовляють в роз'ємних стрижневих ящиках або за допомогою шаблонів, при машинному — тільки в стрижневих ящиках. Для габаритних і складних відливок стрижні виготовляються з застосуванням пруткових, дровових або трубних каркасів, які одночасно слугують для відводу газів. Застосовують також порожнисті оболонкові стрижні, які мають високу міцність, добру газопроникність і легко вибиваються з відливки. В цьому випадку в стрижневу суміш додають термореактивну синтетичну смолу. Сушать стрижні на підвісних плитах у сушилках безперервної дії. Тривалість такої сушки — 1 год на кожні 25 мм товщини. Сушка в стрижневих ящиках за допомогою продувки гарячим повітрям та каталізаторами або за рахунок застосування швидкотверднучих зв'язуючих домішок триває декілька секунд і забезпечує більш точні розміри. Після сушки стрижні підправляють та перевіряють їх розміри. Часто стрижні фарбують протипригарною фарбою.

Складення форм починають з установки нижньої напівформи на заливочну площадку, рольганг або візок конвеєра. Порожнину напівформи продувають стисненим повітрям та встановлюють в ній стрижні. Якщо стрижень не можна стійко встановити в стрижневі знаки форми, то для його підтримки застосовують металічні жердинки, довжина яких відповідає товщині відливки. Потім нижню напівформу обережно, по фіксуєтих штирях, накривають верхньою напівформою. Для запобігання підйому верхньої напівформи статичним тиском металу напівформи скріплюють скобами або ставлять тягар.

Розріз ливарної форми (зібраної по модельному комплекту, зображеному на рис. 9.1) подано на рис. 9.4.

Одержання рідкого металу та заливка форм сплавом проводиться з урахуванням визначених технологічних та параметричних вимог, невиконання яких впливає на якість відливки. Особливе значення при цьому мають: температура перегріву рідкого металу, тривалість заливки, ступінь заповнення ливникової системи розплавом, висота

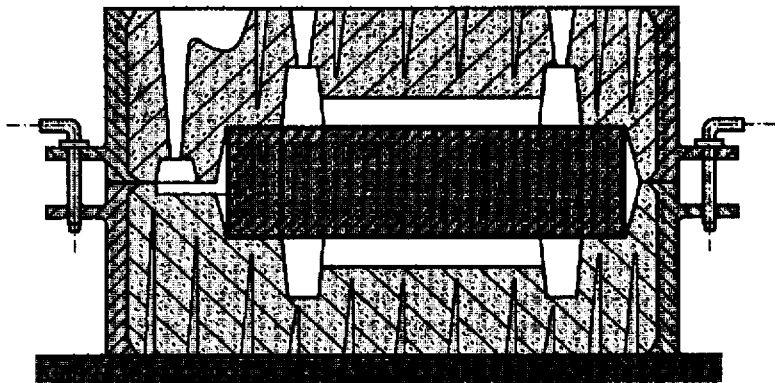


Рис. 9.4
Ливарна форма в складанні

струменя тощо. Рідкий метал з печей подається звичайно в ковші, з яких і робиться заливка форм. Ковші виготовляються з листової сталі, футеруються зсередини вогнетривом. Ковші малої ємності транспортують до місця заливки вручну, а великої ємності — переміщують по монорейці або мостовими кранами. Метал перед заливкою витримують в ковші для видалення газів, спливання шлаків і неметалічних включень, а також для встановлення температури заливки. Оптимальний діапазон заливочних температур основних ливарних сплавів становить: для сталі 1500...1600°, ковкого чавуну 1380...1450 °С, сірого чавуну 1260...1400 °С, бронзи 1100...1150 °С, алюмінієвих сплавів 700...780 °С та магнієвих сплавів 680...780 °С (нижня межа для великогабаритних товстостінних відливок, верхня — для дрібних тонкостінних). Безперервним струменем метал заливають з висоти не більше 200 мм. Залежно від маси відливки тривалість охолодження становить від однієї хвилини до декількох діб. Для скорочення технологічного циклу іноді застосовують примусове охолодження. При температурі 500 °С відливки вибивають із форм. Процес вибивки досить трудомісткий. Супроводжується він великим виділенням пилу, газів та тепла, тому і проводиться або в спеціальних змінах, або в окремих приміщеннях. Вибивку проводять як вручну,

так і за допомогою вібраторів, працюючих на стисненому повітрі, або на спеціальних підставках, або на пневмогідравлічних установках.

Після вибивки відливки із форм литво обрубують та очищують. Обрубка необхідна для видалення ливників. Ливник очищують від чавунних відливок динамічним ударом (або в спеціалізованих барабанах), від сталевих відливок — газовою різкою і беззубими пилами, від кольорових — стрічковими і дисковими пилами. В мілких сталевих та у мідних відливках ливники виділяються прес-кусачками, а в алюмінієвих та магнієвих — обрубними штампами. Від формуючої суміші, що взялася до поверхні, відливки очищують стальними щітками, зубилами або в простих барабанах, де відливки обертаються і труться один об одного та об “зірочки” з білого чавуну. Крім цих методів, широко використовують дробоструменеву, піскоструменеву, гідравлічну, гідропіскоструменеву та дробометальну обробку. Для складних відливок використовують ультразвукову очистку в рідких розчинах, електроконтактну, засновану на впливі теплового ефекту від пропускання електричного струму, і особливо електромеханічну очистку. При електромеханічній очистці відливу вміщують у ванну з NaOH при 500 °C і одержують негативний потенціал (катод) порядку 6 В. Час очистки при цьому не перевищує 10 с.

Після обробки та очистки іноді проводять термічну обробку лиття, яка призначена для зняття внутрішніх напруг, покращання структури і властивостей деталі. Залежно від технологічних потреб відливки піддають термообробці, а саме:

- відпалу;
- нормалізації;
- загартуванню;
- відпуску.

Після очистки окалини, якщо це необхідно, завершується операція огляду та контролю готового відлитого виробу (відливки).

§ 9.4

Лиття в оболонкові форми

При цьому способі лиття деталі одержують у тонкостінних формах-оболонках завтовшки 6...15 мм, виготовлених з високоміцних піщано-смоляних сумішей. Для гарячого тверднення як наповнювач

використовують дрібнозернистий кварцовий пісок з мінімальним вмістом глини, що дозволяє знижувати кількість зв'язуючого — смоли. Для підвищення термічної стійкості в суміш додають хромомагнетит. Як зв'язуючий використовують пульвербакеліт — фенолформальдегідну смолу з домішками уротропіну. Така смола при 70...80 °C розм'якшується, а при 100...120 °C плавиться, перетворюючись на клейку рідину, яка покриває поверхню зерен піску тонкою плівкою. При 200...250 °C смола необоротно твердне, забезпечуючи високу міцність оболонкової форми. При 400...450 °C смола починає вигоряти, а форми-оболонки втрачають міцність.

Формуюча суміш може бути неплакованою та плакованою. В неплакованій суміші смола перебуває в порошкоподібному стані і в такі суміші вводять зволожувачі (наприклад, гас), усуваючи пилоутворення в разі застосування піскодувних машин, або ж розшарування смоли при формовці в установках з перекидним бункером. У плакованій суміші зерна піску покриті тонкою плівкою твердої смоли і така суміш не розшаровується, вона міцніша і газопроникніша. При холодному плакуванні смолу розчиняють або в ацетоні, або в технічному спирті, а при гарячому використовують розплавлену смолу, що складніше, але і більш якісно.

Модельна оснастка для виготовлення оболонкових форм включає моделі, підмодельні плити, ящики для формуючих стрижнів, пристрої для зняття оболонок з підмодельної плити. Виготовляють їх зі сталі, алюмінієвих сплавів та сірого чавуну.

Технологія виготовлення оболонкових форм і стрижнів частіше за все пов'язана з використанням поворотного бункера, на якому заздалегідь укріплюються напівформа або стрижневий ящик. У підігріту напівформу або стрижневий ящик обертом цього бункера засипається піщано-смоляна суміш. Шари цієї суміші нагріваються, смола плавиться і при охолодженні спливають частинки піску, створюючи тверду оболонку. При створенні оболонок необхідної товщини бункер з напівформою або стрижневим ящиком знову повертають на 180°, залишки суміші висипають у бункер, а оболонкову напівформу чи стрижень звільняють з ящика. Широко застосовують і піскодувний спосіб поперемінного заповнення та видалення надлишку суміші з робочої порожнини обігрівальних платформ та стрижневих ящиків.

Під час складання напівформи склеюють в гарячому стані порошкоподібним пульвербакелітом під тиском, а в холодному стані — рідкими клеями, які тверднуть при нагріві. Зібрані форми з горизонтальною плоскістю рознімання кладуть для заливки на шар піску, а з вертикальною плоскістю рознімання та великогабаритні форми для

запобігання жолоблення і передчасного руйнування ставлять у контейнери і засипають чавунним дробом.

Основними достоїнствами даної технології можна вважати те, що: одержують гладку поверхню форм та стрижнів; деталі мають високу точність розмірів; тонка газова сорочка від вигорання смоли захищає поверхню відливок від пригорання; руйнування форми після вигорання смоли полегшує вільну усадку сплаву і спрощує вибивку відливок; регенерація суміші (після відпалу при 700...800 °С) зменшує витрати свіжого піску.

§ 9.5

Лиття з використанням плавких і газифікованих моделей

Лиття за *плавкими* моделями — це прогресивний спосіб точного лиття. Сутність його полягає в тому, що деталі одержують заливкою металу в нероз'ємні тонкостінні (5...6 мм) керамічні форми, виготовлені за допомогою моделей з легкоплавких складів, наприклад 50 % парафіну та 50 % стеарину з температурою плавлення 55 °С. Оболонку за цією технологією одержують шляхом неодноразового змочування моделі в спеціальній суспензії з наступною обсіпкою піском та висушуванням. У складі суспензії може бути до 50 % кремнезему (SiO_2) і до 30 % пильного кварцу. Моделі з форм виплавляють у ваннах з гарячою водою, а більш тугоплавкі моделі — в висококиплячих рідинах (наприклад, полігліколь з $T_{\text{пл}} = 200...250$ °С).

Керамічну оболонку сушать на повітрі після нанесення кожного шару впродовж 2...4 год, а прискорюють процес сушки, застосовуючи пари аміаку. Остаточні оболонки тверднуть при 900...1000 °С, після чого з матеріалу оболонки виділяються залишки модельних складових та газів.

Основні переваги цієї технології в тому, що керамічні оболонки легко відшаровуються на вібраційних решетах, і складні за формою моделі можна відливати з будь-яких сплавів з підвищеною точністю та чистотою поверхні (в деяких випадках цілком виключається необхідність механічної обробки деталей).

Лиття за *газифікованими* моделями — це спосіб точного лиття. За цією технологією моделі, що виготовлені зі вспінюваного полі-

стиролу, з форми не видаляють. Вони газифікуються під час заливки сплавом. Цей спосіб широко застосовують при виготовленні великогабаритних складних відливок.

§ 9.6

Лиття в металеві форми (кокілі)

Кокіль — це форма багаторазового використання. В кокілях звичайно одержують до 500 сталених відливок і декілька десятків тисяч відливок з легких сплавів. Особливо широко цей спосіб застосовують для одержання відливок з алюмінієвих та магнієвих сплавів.

Сутність способу полягає в одержанні литих деталей шляхом вільної заливки розплаву в металічні форми: нероз'ємні (витушувальні) і роз'ємні. *Нероз'ємні* кокілі застосовують для одержання невеликих відливок простої конфігурації, а більш складні і великогабаритні відливки одержують в роз'ємних кокілях. Вони звичайно складаються з двох частин — напівформи з вертикальною, горизонтальною або складними площинами розняття. Порожнину в відливках одержують за допомогою стрижнів, виготовлених із стрижневої суміші або металу. При складній формі металічний стрижень роблять розбірним, наприклад з трьох частин. Під кінець затверднення відливки спочатку виділяють середню частину такого стрижня (клин), після цього його бокові частини, інші стрижні (якщо вони є), потім розкривають кокіль і видаляють відливку.

Для видалення повітря та газів при заливці по лініях рознімання кокілю або в спеціальних пробках роблять газовідвідні канали завглибшки 0,2...0,5 мм.

Кокілі частіше за все роблять з чавуну та сталі. Для підвищення їхньої стійкості на внутрішню поверхню наносять вогнетривкі покриття та фарби. Для одержання відливок зі щільною структурою застосовують тонкостінні покриття до 0,5 мм. Великогабаритні товстостінні сталені та чавунні відливки одержують у футерованих кокілях з покриттям 6...12 мм.

Інтенсивність теплообміну при литті в кокіль у 3...10 разів більша, ніж при литті в одноразові форми, що сприяє одержанню дрібнозернистої структури. Проте при цьому сплав знижує свою рідкотекучість через швидке охолодження, тому кокіль перед заливкою нагрівають до 100...300 °С. Відливки виходять високої точності за

розмірами і з чистою поверхнею, що зменшує або виключає механічну обробку. При литті в кокіль процес максимально механізований та автоматизований, що забезпечує високу продуктивність праці та низьку собівартість відливок.

§ 9.7

Лиття під тиском та інші способи лиття

Лиття під тиском — найбільш продуктивний спосіб виготовлення невеликих відливок з кольорових сплавів з високою точністю розмірів та чистотою поверхні. За цією технологією (рис. 9.5) розплав заповнює прес-форму за декілька секунд під тиском поршня до

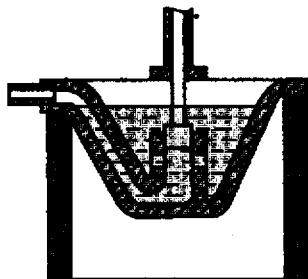


Рис. 9.5
Лиття під тиском

300 МПа. Після швидкого затверднення відливка прес-форма розкривається і готова відливка видаляється штовхачем з холодних або гарячих камер пресування. *Холодні камери* використовують для одержання відливок із латуней, алюмінієвих, магнієвих та інших сплавів кольорових металів, а також зі сталей. *Гарячі камери* пресування використовують для одержання відливок з цинку, свинцево-сурм'янистих, алюмінієвих та магнієвих сплавів. В автоматичному режимі продуктивність установок для лиття під тиском досягає за годину 3000 штук і більше. Таке лиття дуже вигідне при масовому виробництві складних фасонних тонкостінних відливок із кольорових сплавів.

Основний недолік технології лиття під тиском пов'язаний з тим, що ливники тверднуть раніше відливки, до завершення усадки, що спричинює газоусадочну пористість. У зв'язку з цим такі відливки не

можна піддавати термообробці, оскільки розширення газових пор може призвести до спучення поверхні металу. Ефективним методом боротьби із вказаним недоліком є вакуумізація процесу.

Відцентрове лиття характеризує процес формування відливок під дією відцентрових сил при вільній заливці металу в обертові форми (рис. 9.6). Форми можуть обертатися навколо вертикальної або горизонтальної осі. В формах з вертикальною віссю обертання для

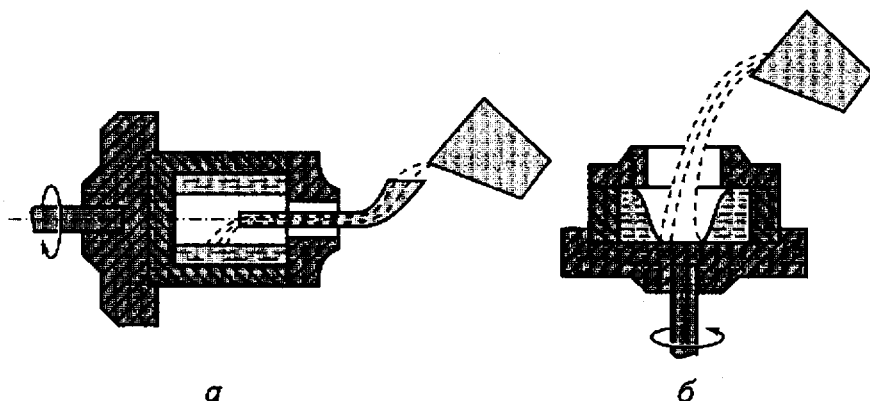


Рис. 9.6

Відцентрове лиття:

а — з горизонтальною віссю обертання; б — з вертикальною

зниження шкідливого ефекту різностінності по висоті одержують відливки невеликої висоти (короткі втулки, кільця, фланці тощо). Довгі тіла (труби, втулки, вісі тощо) відливають у формах з горизонтальною віссю обертання. За цією технологією за годину відливають до 50 труб діаметром 300 мм та завдовжки 5 м.

Основні досягнення технології відцентрового лиття в тому, що забезпечується добре заповнення форми для сплавів зі зниженою рідкотекучістю, тобто за такими методами можна одержувати тонкостінні відливки. Недолік методу полягає в неоднорідності хімічного складу за товщиною відливки через підвищену ліквіацію.

Широко застосовуються також напівбезперервне лиття чавунних труб та втулок, лиття вижиманням за допомогою обертаючих валків із внутрішнім водяним охолодженням, лиття вакуумним всмоктуванням, лиття “наморожуванням” за рахунок сил поверхневого натягу при витягуванні затравки з рідкого розплаву (у такий спосіб одержують стрічки завширшки до 100 мм і більше), електрошлаковий переплав.

 Контрольні запитання

1. У чому сутність ливарного виробництва?
2. Які ливарні властивості сплавів?
3. Які вимоги враховують при виготовленні виливків?
4. Що являє собою модельний комплект?
5. Які є різновиди ливарних форм?
6. Що являє собою ливникова система?
7. Які властивості повинні мати формівні та стрижневі суміші?
8. Як методи виготовлення форм і стрижнів застосовують у ливарному виробництві?
9. У чому полягає сутність лиття в оболонкові форми?
10. У чому полягає сутність лиття при використанні плавких та газифікованих моделей?
11. У чому сутність лиття в металеві форми (кокілі)?
12. У чому сутність лиття під тиском та відцентрового лиття?

Глава 10

Технологія обробки тиском

§ 10.1

Сутність процесу і види обробки

Технологічний процес отримання фасонних деталей і заготовок у спосіб пластичного деформування металу в холодному та гарячому стані називають *обробкою металів тиском*. При цьому використовують одну з основних властивостей металів — здатність до пластичного деформування. *Пластичністю* називають здатність металів до залишкової зміни форми (див. § 1.3; § 1.4). Обробка тиском дозволяє отримувати вироби різного призначення і форми у вигляді заготовок для подальшої обробки різанням, а також готових деталей високої точності виготовлення і якості поверхні.

Процеси обробки тиском поділяють на шість основних видів:

- прокатування;
- волочіння;
- пресування;
- кування;
- об'ємне штампування;
- листове штампування.

Застосування того чи іншого виду обробки тиском зумовлене можливостями формоутворення виробів і підвищення механічних властивостей металу внаслідок пластичного деформування, технологічною та економічною доцільністю.

§ 10.2

Фактори, що впливають на процес обробки, і обладнання для нагрівання металу

Обробка тиском заснована на здатності металів (полікристалів) за певних умов до пластичної деформації. Пластична деформація металу здійснюється за рахунок зсувів між окремими кристалітами (зернами) та за їх власної деформації. Розрізняють два механізми пластичної деформації: • деформація ковзанням; • деформація двійникуванням.

Ковзання — це зсув однієї частини кристала відносно іншої під дією дотичних (зсувних) напружень по певних кристалографічних площинах і напрямках.

Двійникування — це перехід частини кристала в положення, симетричне іншій його частині. Пластична деформація зерен металу призводить до змін його фізико-механічних властивостей. Якщо ці зміни зберігаються після деформування, то її називають *холодною пластичною деформацією*, а явище зміни властивостей у сукупності — наклепом або зміцненням.

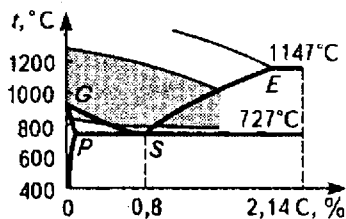
Під час нагрівання зміцненого у такий спосіб металу відбувається перебудова його кристалічної структури і за певних умов заміна деформованих зерен новими, рівновісними. Це явище називають *рекристалізацією*, а *деформацію*, під час якої вона відбувається по всьому об'єму металу, називають *гарячою*. Слід пам'ятати, що промислові сплави мають неметалічні вкраплення, які розміщуються між зернами полікристала. При деформуванні металу ці вкраплення витягуються, формуючи волокнисту структуру (текстуру), що зумовлює різний рівень властивостей (анізотропію) вздовж і впоперек виробу. Це враховують при виготовленні конкретних деталей, додержуючись двох правил:

- волокна металу мають відповідати контуру деталі й не перерізатися;
- розтягуючи зусилля повинні діяти вздовж волокон.

У процесі обробки тиском (за пластичного деформування) змінюються не лише форма заготовки, але й властивості металу. Основні технологічні властивості металу, який піддають обробці тиском, це пластичність і опір деформуванню (поріг текучості й міцність). Вони залежать від хімічного складу сплаву, його чистоти, температури та швидкості деформації. Відомо, що при підвищенні температури пластичність зростає, а міцність зменшується. Проте у вуглецевих сталях в інтервалі 100...400 °С можливий зворотний процес. Цей

інтервал температур називають зоною крихкості, або синьоламкості. Зі зростанням швидкості деформації пластичність знижується, хоча поріг текучості зростає. На технологічні властивості деталей впливає також фазово-структурний стан металу, що оброблюється. Так, механічне нагартування зменшує пластичність металу. Важливе значення при обробці тиском має схема прикладання зусиль і напруженого стану заготовки.

Рис. 10.1
Температурний інтервал
нагрівання вуглецевої сталі
для обробки тиском



Нагрівання металу перед деформуванням — важлива операція при обробці тиском, яка забезпечує необхідне підвищення пластичності та знижує опір деформації. Температурний інтервал обробки характеризують верхня (T_v) і нижня (T_n) температури нагрівання. Температурний інтервал обробки вибирають за діаграмою стану (рис. 10.1), оскільки температура плавлення сталі й чавуну ($T_{пл}$) залежить від вмісту в них вуглецю.

T_v відповідає температурі, нижчій від температури плавлення на 150...250 °C. T_n на 30...50 °C перевищує температуру закінчення фазових перетворень. Температурний інтервал гарячої обробки тиском вуглецевих сталей з 0,2...0,7 % C дорівнює 1280...850 °C, а з 0,8...1,3 % C, відповідно, 1100...760 °C. Сплави міді оброблюють в інтервалі 900...700 °C, дюралюмінію — 470...400 °C, титану — 1100...900 °C.

Метал необхідно нагрівати за режимами, що запобігають утворенню термічних тріщин. Так, заготовки вуглецевих сталей діаметром понад 150 мм і заготовки легованих сталей нагрівають поступово у два етапи: повільне нагрівання з видержуванням при 700...800 °C; нагрівання до необхідної температури з максимально можливою швидкістю. При температурах понад 700 °C відбувається інтенсивне окислення поверхні сталі з утворенням жаровини, що складається з оксидів заліза Fe_2O_3 , Fe_3O_4 і FeO . З підвищенням температури до 1330...1350 °C жаровина розплавляється і залізо горить (яскраво-блакитні іскри). Угар металу при одноразовому нагріві в печі поменшевого нагрівання становить 1,5...2,5 %, а при підвищених температурах відбувається також зневуглецювання поверхні сталі на

0,2...0,5 мм, іноді — до 1,5...2,0 мм. Для запобігання цьому використовують електронагрівання або захисні атмосфери. Високі температури зумовлюють інтенсивний ріст зерна (перегрів сталі) та зниження механічних властивостей сталі. Цей вид браку усувають відпалом.

У разі нагрівання сталі до температури, що наближається до температури плавлення, на границях зерен інтенсивно утворюються оксиди, відбувається розплавлення легкоплавких міжзеренних прошарків. Це призводить до утворення тріщин і втрати пластичності. Такий вид браку називають *перепалом*, його не можна виправити термічною обробкою, тому перепалений метал відправляють на переплавку.

Для нагрівання заготовок перед обробкою тиском використовують печі й електронагрівачі: печі — для нагрівання зливків і великих заготовок, електронагрівачі — для нагрівання середніх і дрібних заготовок.

Печі, залежно від джерела енергії, бувають *полуменеві й електричні* (найпоширеніші). У полуменевих печах тепло одержують завдяки згорянню рідкого (мазуту) або газоподібного палива. За принципом дії розрізняють печі камерні й методичні.

Камерні печі бувають стаціонарними і переносними (для заготовок діаметром до 150 мм), карусельні, конвеєрні, з висувним подом, оснащені різними допоміжними пристроями. Різновидом камерних печей є нагрівальні колодязі, що використовуються для нагрівання зливків великих розмірів при прокатуванні й куванні.

Методичні печі характеризуються наявністю трьох зон з різними температурами і значною довжиною (8...22 м). У серійному виробництві вони призначені для нагрівання великогабаритних заготовок під прокатування. Для нагрівання заготовок діаметром до 120 мм використовують печі з двома температурними зонами. Такі печі називають *напівметодичними*.

В електричних нагрівальних пристроях використовують індукційний або електроконтактний нагрів. Перший заснований на виникненні в заготовці, розміщеній в електромагнітному полі, вихрових струмів. Взаємодія цих струмів із заготовкою призводить до її нагрівання. Електроконтактне нагрівання відбувається завдяки виділенню тепла під час безпосереднього проходження струму через заготовку. Його застосовують для нагрівання сталевих заготовок діаметром до 75 мм. Швидкість електронагріву, порівняно з нагріванням у печах, у 8...10 разів вища, а інтенсивність утворення жаровини — у 4...5 разів менша.

§ 10.3

Прокатування листового та профільного металу

Прокатування — це обробка металу тиском, за якої заготовка обтискується валками прокатного стану, що обертаються. Метал деформують у гарячому або холодному стані, конфігурація і взаємне розташування валків (частіше двох) різні. Основні види прокатування:

- поздовжнє;
- поперечне;
- гвинтове (рис. 10.2).

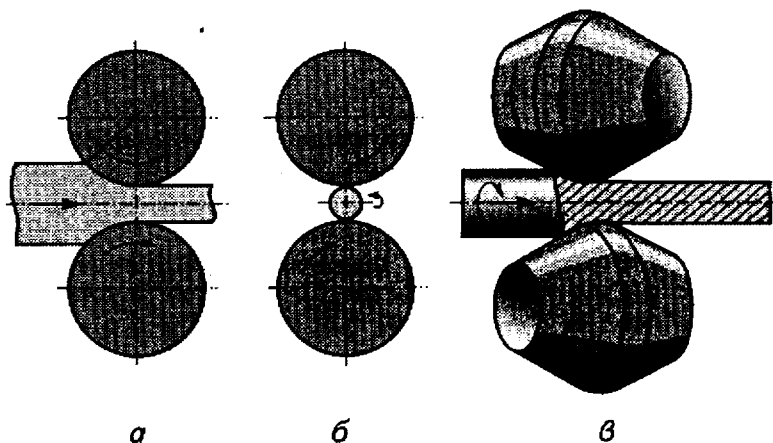


Рис. 10.2

Основні способи прокатування:

а — поздовжнє; б — поперечне; в — гвинтове

За поздовжнього прокатування (рис. 10.2, а) заготовка переміщується перпендикулярно вісі валків, що обертаються у протилежних напрямках. За цією схемою виготовляють до 90 % прокату. Під час поперечного прокатування (рис. 10.2, б) валки з паралельними осями обертаються в одному напрямку і обертають заготовку, яка, деформуючись, переміщується вздовж осі валків. За такої схеми частіше використовують не два, а три валки. Поперечно-гвинтове прокатування (рис. 10.2, в) здійснюється за допомогою валків, що обертаються в одному напрямі й розташовані під кутом один до одного. Таке

розташування валків забезпечує виникнення осьового зусилля, яке переміщує заготовку.

Найбільш важливими параметрами процесу прокатування є відносне обтискування (або ступінь деформації, %) і коефіцієнт витягування.

Відносне обтискування визначають за формулою

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0},$$

де h_0 і h_1 — товщина заготовки відповідно до і після обтискування.

Коефіцієнт витягування

$$\mu = \frac{L_1}{L_0},$$

де L_0 і L_1 — довжина заготовки відповідно до і після прокатування. Коефіцієнт витягування є основною характеристикою процесу прокатування. За один прохід заготовки він дорівнює 1,1...1,6 (іноді 2...2,5).

Величину деформації за один прохід обмежують умови захвату металу валками, тертя між валками і заготовкою. Умову захвату заготовки валками описує формула

$$f > \operatorname{tg} \alpha,$$

де f — коефіцієнт тертя; α — кут захвату.

Кут захвату α — центральний кут (див. рис. 10.2, а). Він спирається на дугу захвату, завдяки якій валок контактує із заготовкою. За гарячого прокатування $\alpha = 15...24^\circ$, а за холодного — $3...10^\circ$. Швидкість виходу металу з валків більша за швидкість металу на вході, яка менша за швидкість обертання валків.

Основний інструмент прокатування — *валки*. Вони бувають:

- гладкі;
- калібровані (рівчаківі).

Гладкі валки бочкоподібні, використовують їх для прокатування листа, смуг тощо. На *каліброваних валках* одержують прокат складного профілю. Робоча поверхня каліброваних валків має спеціальні канавки — *рівчаки*. Сукупність рівчаків пари валків називають *калібром*. На кожній парі валків розміщується кілька калібрів. За призначенням калібри прокатних валків поділяють на:

- обтискні (витяжні);

- чорнові (або підготовчі);
- чистові.

Обтискні калібри призначені лише для зменшення перерізу прокатуваного металу. Вони переважно мають прямокутну, ромбічну або овальну форми. У *чорнових калібрах* змінюють форму поперечного перерізу металу, поступово наближаючи її до форми готового виробу. *Чистові калібри* формують кінцевий профіль прокату, враховуючи коефіцієнт лінійного розширення і допуски щодо розмірів профілю. Сортамент одержаного прокату визначається сукупністю профілів і розмірів прокатуваного металу. *Профіль* — це форма поперечного перерізу прокату. За сортаментом продукцію прокатного виробництва поділяють на чотири групи:

- сортовий прокат;
- листовий;
- спеціальний;
- періодичний прокат.

Сортівний прокат поділяють на профілі простої геометричної форми (рис. 10.3).

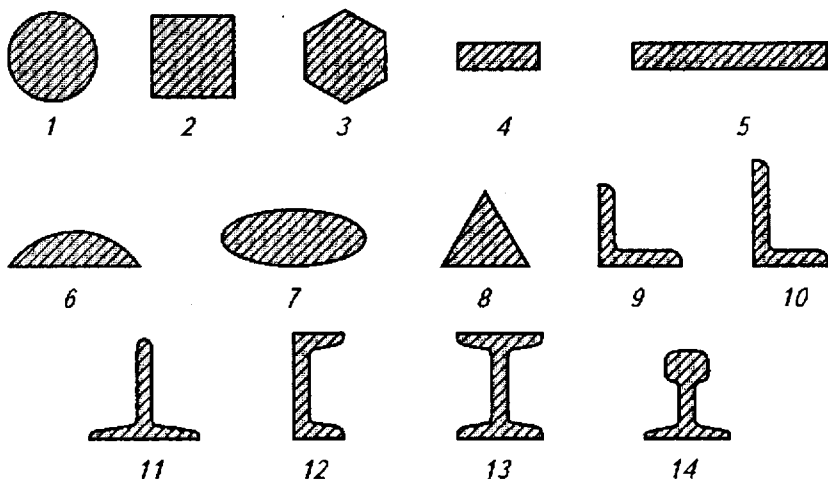


Рис. 10.3

Сортамент прокату:

- 1 — круг; 2 — квадрат; 3 — шестигранник; 4 — смуга; 5 — лист; 6 — сегментна сталь;
7 — овальна сталь; 8 — тригранна сталь; 9 — рівнобокий кутик; 10 — нерівнобокий кутик;
11 — таврова балка; 12 — швелер; 13 — двотаврова балка; 14 — рейка

Листову сталь поділяють на *тонколистову* (завтовшки до 4 мм) і *товстоллистову*. Деякі сорти листової сталі призначені для певних галузей промисловості: котельна, автотракторна, електротехнічна.

Трубний прокат поділяють на зварний і безшовний.

До спеціальних видів прокату відносять: • вагонні та зубчасті колеса; • кульки; • періодичний і гнутий профіль.

Заготовками для сортового прокату є *блуми* (у перерізі від 150×150 до 450×450 мм), а для листового — *сляби* (плити завтовшки до 350 мм). Прокат використовують також як заготовки для ковальсько-штампувального виробництва, механічної обробки різанням і зварних конструкцій. Продукцію прокатного виробництва одержують на прокатних станах з однією або кількома робочими клітьми, прокатними валками і приводом, що складається з електродвигуна і передавального механізму.

§ 10.4

Прокатування труб

Прокатуванням одержують два види труб: • безшовні; • зварні. Заготовками для безшовних труб служать зливки і катані круглі профілі діаметром 120...320 мм. Операції з виготовлення безшовних труб такі:

- прошивка отвору в заготовці й одержання товстостінної гільзи;
- прокатування гільзи у трубу;
- обробка готової труби.

Прошивку отвору здійснюють на прошивному стані, використовуючи схему поперечно-гвинтової прокатки (рис. 10.4). Радіальні розтягуючі напруження, що виникають у металі, сприяють легшій прошивці отвору оправкою (2) за допомогою бочкоподібних валків (1 і 3), осі яких розташовані під кутом 4...14°. Після прошивки і нагрівання гільза розкатується між двома валками на оправці (2) — дорні (рис. 10.5) розкатного стану. Зазор між оправкою і калібром валка визначає товщину стінки труби. Прокатують трубу за два проходи з поворотом на 90°.

На автоматичних станах прокатують труби діаметром понад 60 мм, а меншого діаметра (до 45 мм) — на періодичних (пілігримових) станах. Зменшення діаметра здійснюють на безперервних

редукційних станах, в яких прокатування проводять без оправки, а далі — на станах холодного волочіння або прокатування. Обкатування (збільшення діаметра труб на оправці) здійснюють на обкатному стані, який за конструкцією аналогічний прошивному.

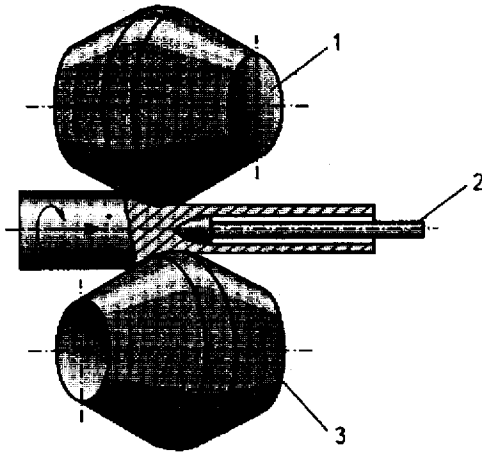


Рис. 10.4

Схема поперечно-гвинтового
прокатування з прошивкою отвору

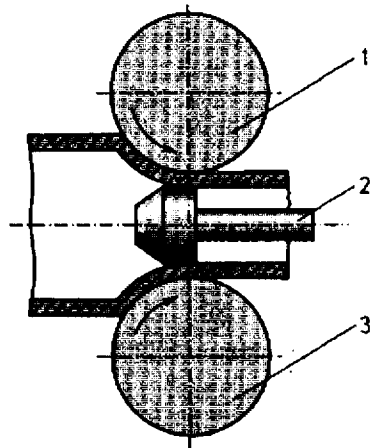


Рис. 10.5

Схема розкатування труб

Зварні труби, діаметр яких досягає 2500 мм, значно дешевші за безшовні, проте поступаються їм у міцності. Як заготовку для них використовують стрічку (штрипс) або лист завиришки окружності труби. Операції з виготовлення зварної труби такі: • формування плоскої заготовки в трубу; • зварювання труби; • обробка; • правка труби.

Для виробництва труб застосовують контактне зварювання опром, електродугове під флюсом, аргондугове і безперервне пічне зварювання.

§ 10.5

Волочіння

Волочіння — це процес протягування (часто в холодному стані) прокатних або пресованих заготовок крізь отвір у матриці (волока, фільєра), що поступово звужується. Волока (ціла або складна) має отвір (рис. 10.6, *а*), який складається з чотирьох зон: змащувальної, або вхідної (1), робочого конуса, або деформуючої зони (2), калібрувального поясу (3) і вихідного конуса (4). Кут робочого конуса залежить від здатності металу деформуватися і дорівнює $6...12^\circ$, ширина калібрувального поясу $2...10$ мм.

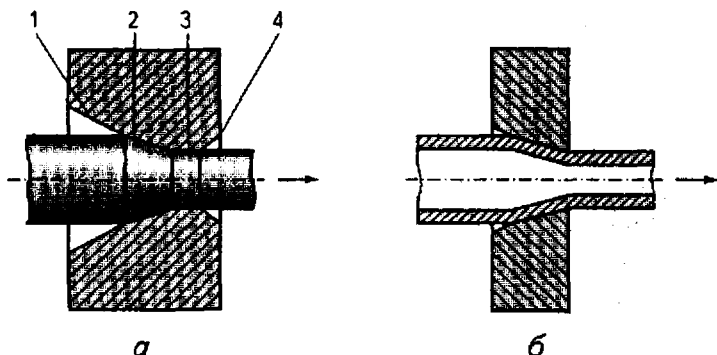


Рис. 10.6

Схема волочіння:

а — прутка; *б* — труби

Робочу частину матриці виготовляють з інструментальних сталей, твердих сплавів і технічних алмазів. Волочінням одержують вироби точних розмірів із заданою якістю поверхні.

Основним параметром процесу волочіння є ступінь обтискування, який визначають так само, як і при прокатуванні, тільки замість товщин враховують площі поперечних перерізів заготовки. За одnorазового волочіння обтискування становить $30...35$ %. Волочіння здійснюють за кілька проходів, застосовуючи змащувальні речовини — машинне масло, водяні емульсії, міднення заготовки. Передбачається також охолодження заготовок. Нагартування металу в процесі волочіння знімають відпалюванням.

Волочінням обробляють вуглецеві й леговані сталі, кольорові метали та їхні сплави. За технологією волочіння одержують прутки

діаметром 3...150 мм, дріт діаметром 0,006...16,0 мм, труби діаметром від капілярних до 200 мм з товщиною стінки 1,5...12 мм.

Труби виготовляють за двома технологічними схемами: для зменшення лише діаметра труби — без оправки (рис. 10.6, б); для одночасного зменшення діаметра та товщини стінки — застосовуючи оправки.

Для волочіння використовують волочильні стани з прямолінійним рухом заготовки і намотуванням металу на барабан. Швидкість волочіння такого дроту на барабанних станах досягає 40 м/с.

§ 10.6

Пресування

Обробка металу пресуванням зводиться до видавлювання металу із замкненого об'єму (контейнера) крізь отвір у матриці. Профіль пресованого виробу відповідає перерізові отвору і конфігурації матриці. При пресуванні використовують всебічне обтискування, що забезпечує високу пластичність металу порівняно з іншими процесами обробки тиском.

Пресування характеризують такі основні параметри.

1. Коефіцієнт витягування

$$\lambda = F_{\kappa} / F_{\text{м}},$$

де F_{κ} — площа перерізу контейнера;

$F_{\text{м}}$ — площа перерізу матриці.

2. Ступінь деформації

$$\epsilon = \frac{F_{\kappa} - F_{\text{м}}}{F_{\kappa}} \cdot 100 \, \%,$$

3. Швидкість витікання металу з отвору матриці

$$V_{\text{в}} = \frac{F_{\kappa} - F_{\text{м}}}{F_{\kappa}} \cdot V_{\text{п}},$$

де $V_{\text{п}}$ — швидкість пресування.

Процеси пресування характеризуються значною нерівномірністю деформації, особливо при застосуванні багатоканальних матриць. Основною умовою успішного здійснення процесу є правильний ви-

бір температури та швидкості пресування з урахуванням властивостей матеріалу. При пресуванні широко використовують змащування (графітовою пастою) або оміднення заготовки. Пресуванням оброблюють пластичні та малопластичні матеріали. До недоліків цього процесу слід віднести значні відходи металу та інтенсивне спрацювання інструменту. Пресуванням одержують прутки діаметром 5...250 мм, дріт діаметром 5...10 мм, труби із зовнішнім діаметром 20...400 мм і товщиною стінки 1,5...22 мм та інші вироби.

Серед методів пресування розрізняють: • пряме; • зворотне; • суміщене з прошивкою; • з протитиском; • вакуумне тощо. Основними є методи прямого і зворотного пресування. За прямого пресування (рис. 10.7, а) напрямок виходу металу (3) крізь отвір матриці (5) збігається з напрямком руху пуансона (1), тиск якого на

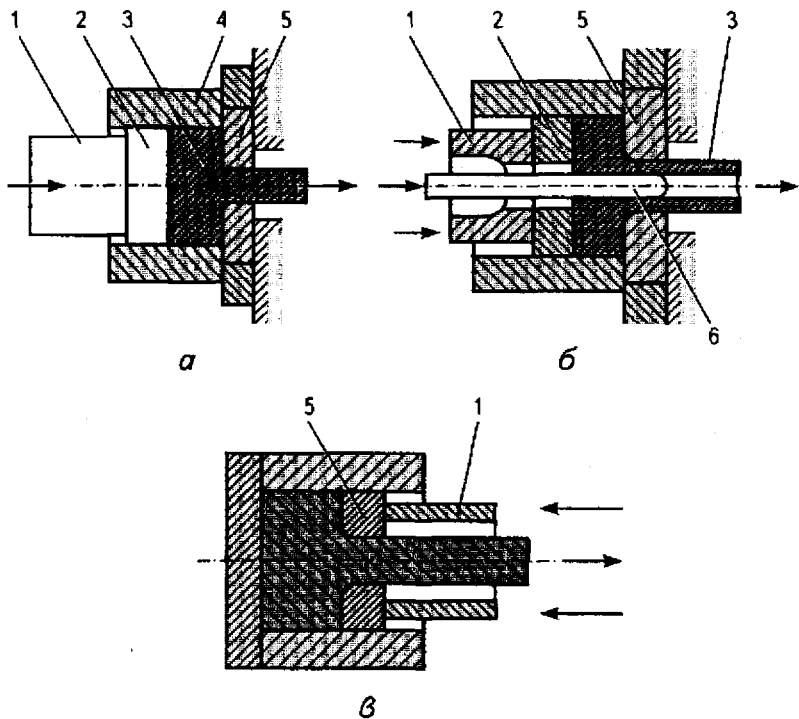


Рис. 10.7

Основні схеми пресування:

а — пряме; б — з прошивкою; в — зворотне

заготовку передається через прес-шайбу (2). Ту частину заготовки, яка залишається в контейнері (4), називають *прес-залишком* (8...12 % від маси заготовки).

При пресуванні труб заготовки спочатку прошивають голкою (6) (рис. 10.7, б), що проходить крізь пуансон (1). Під час подальшого переміщення пуансона і прес-шайби (2) метал видавлюється у вигляді труби (3) крізь кільцевий зазор між стінками отвору в матриці (5) і голкою (6).

За зворотного пресування (рис. 10.7, в) матрицю (5) встановлюють у кінці порожнистого пуансона (1) і метал пересувається у напрямку, протилежному рухові пуансона. Прес-залишок при цьому дорівнює 6...10 % від маси заготовки. Швидкості пресування за основними методами досить високі. Так, при виготовленні сталевих труб швидкість пресування досягає 5 м/с і більше.

Основне обладнання, яке використовують при пресуванні, — це горизонтальні й вертикальні гідравлічні преси з зусиллям 3...250 МН і робочим тиском рідини до 40 МПа. Як допоміжне обладнання застосовують нагрівальне устаткування, механізми подачі й очищення заготовок, нанесення мастила, відокремлення виробів від прес-залишку тощо.

Серед нових методів поширені такі технології:

- пресування без прес-залишку;
- холодне швидкісне;
- пресування “з сорочкою”;
- гідростатичне.

Пресування без прес-залишку застосовують для обробки алюмінію та його сплавів. За цією технологією після першого пресування прес-залишок не виймають з контейнера, а завантажують у нього новий зливоч (заготовку). При наступному пресуванні прес-залишок зварюється з новим зливком так надійно, що визначити місце зварювання практично неможливо.

У разі *холодного швидкісного пресування* заготовка до контейнера надходить холодною, але швидкість пресування підвищують у кілька разів — до 10...15 м/с. За рахунок тепла деформації метал нагрівається. За цим методом обробляють сплави алюмінію, титану, цирконію, оскільки деформація їх у гарячому стані ускладнюється значним окисленням поверхні заготовок.

Для *пресування “з сорочкою”* діаметр прес-шайби обирають дещо меншим від діаметра контейнера. За рахунок цього прес-шайба зрізує метал, і “сорочка” у формі тонкостінного циліндра залишається в контейнері. Всі поверхневі дефекти, що утворилися на заготовці під

час лиття або нагрівання, залишаються у “сорочці” й разом із прес-залишком виводяться у відходи, не потрапляючи до виробів.

Метод *гідростатичного пресування* (гідроекструзія) зводиться до видавлювання металу рідиною під дуже високим тиском (до 3000 МПа). Заготовка не торкається стінок контейнера, від матриці вона також відділена тонким шаром рідини. Завдяки цьому в металі не виникають розтягуючі напруження. Цей метод дає можливість обробляти найбільш крихкі й важкооброблювані матеріали (вольфрам, молібден, хром, швидкорізальні сталі тощо). Наприклад, за цією технологією з вольфраму одержують трубки з поліпшеними властивостями металу, стінки яких завтовшки 0,2...0,3 мм.

§ 10.7

Кування

Кування — це процес деформування нагрітої металевої заготовки між бойками молота або преса. Пластичне деформування при цьому здійснюється на окремих ділянках нагрітої заготовки. Метал вільно тече в напрямках, не обмежених поверхнями інструмента. Куванням одержують вироби відносно простої форми, що не потребують значної обробки різанням. Для виготовлення куванням дрібних і середніх виробів використовують заготовки сортового прокату і блюми, для великих — зливки. Масу заготовки розраховують як суму об'ємів поковки і відходів. Поперечний переріз заготовки вибирають з урахуванням забезпечення необхідного укову, який показує, в скільки разів змінюється поперечний переріз заготовки у процесі кування. Чим більший уков, тим краще проковано метал і тим вищі його механічні властивості.

Деформацію металу при вільному куванні характеризує коефіцієнт укову, який визначає співвідношення більшої площі поперечного перерізу до меншої. При обробці сталевих виливків уков має бути не меншим як 3...5, а прокатаних заготовок — 1,1...1,5.

Кування поділяють на *ручне* (для дрібних виробів) і *машинне* (для поковок більших типорозмірів). Залежно від цього виконуються різні технологічні операції з використанням відповідного інструмента.

Виконуючи в певній послідовності прості операції кування, одержують вироби складної конфігурації. Основними операціями процесу кування є:

- осадка;
- висадка;
- прошивка;
- протяжка;
- розгонка;
- рубка;
- згинання та скручування;
- передача (рис. 10.8).

Осадка — це збільшення поперечного перерізу вихідної заготовки за рахунок зменшення її висоти. Для правильного осаджування металу висота вихідної циліндричної заготовки має не перевищувати трьох діаметрів, торці мають бути рівними і паралельними (рис. 10.8, а).

Висадка використовується для одержання поковки з потовщенням на кінці або на середині заготовки. При цьому деформацію заготовки обмежують у деякій її частині, використовуючи кільцеві

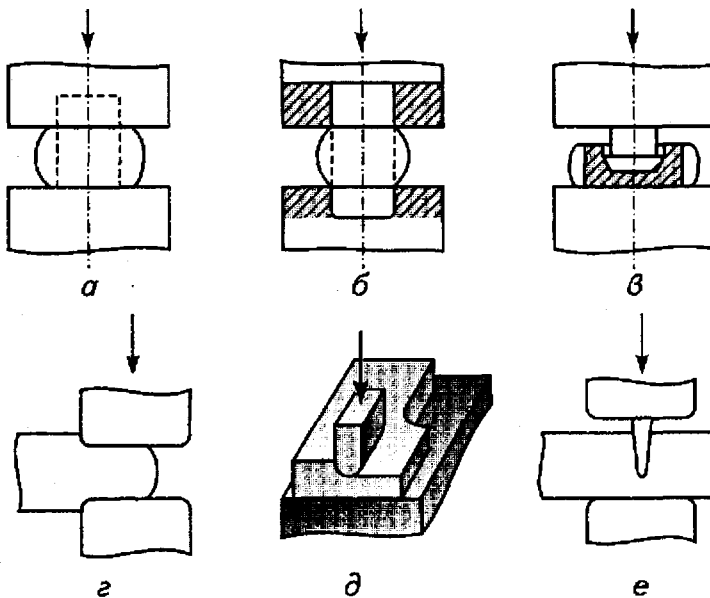


Рис. 10.8
Схеми деяких операцій кування

плитки (рис. 10.8, б). Так виготовляють поковки болтів, деталей з буртами, фланцями тощо.

Прошивка — це одержання в заготовці наскрізного отвору або заглиблення (рис. 10.8, в). Її також використовують для видалення неякісної серцевини зливка.

Протягуванням досягають збільшення довжини заготовки за рахунок зменшення її поперечного перерізу (рис. 10.8, г). Це найпоширеніша операція вільного кування, що здійснюється послідовними ударами або натискуванням на окремі суміжні частини заготовки. Протягуванням у вирізних бойках одержують поковки з подовженою віссю, з яких виготовляють вали, шатуни, важелі тощо.

Розгонка — це збільшення ширини частини заготовки за рахунок зменшення її товщини (рис. 10.8, д).

Рубка — відокремлення однієї частини заготовки від іншої (рис. 10.8, е). Інструментом для цього слугують прямі й фігурні сокири та зубила. Рубку часто використовують для видалення надлишків металу, а також для створення уступів, заплечиків тощо.

Згинання та скручування металу здійснюють з використанням різних пристроїв: підкладок, ключів, воротків, лебідок.

Передача металу зводиться до переміщення однієї частини заготовки відносно іншої. Ця операція застосовується при виготовленні колінчастих валів і подібних до них деталей.

Основним технологічним обладнанням для кування є молоти і гідравлічні преси. Молоти відносять до машин динамічної дії, за допомогою яких пластична деформація металу заготовки здійснюється за тисячні частки секунди зі швидкістю деформування до 6,5 м/с. Деформування металу забезпечує енергія, накопичена падаючими частинами молота. Маса падаючих частин пневматичних молотів становить 50...1000 кг, пароповітряних — 1000...8000 кг. Гідравлічні преси відрізняються від молотів тим, що статично впливають на метал заготовки. Тривалість деформації при цьому досягає десятків секунд, а швидкість деформації — 2...3 м/хв. Максимальні зусилля гідравлічних пресів становлять 5...150 МН. Преси використовують для виготовлення поковок значних розмірів, а також для кування низькопластичних високолегованих сталей і сплавів кольорових металів.

§ 10.8

Штампування

Гаряче об'ємне штампування — це процес виготовлення поковок у спеціальному інструменті (штампах), який обмежує плин металу в різні боки під час деформування. Робоча частина штампа (рівчак) при замиканні його складових частин після закінчення штампування відповідає формі поковки. Гаряче штампування, порівняно з куванням, дає змогу виготовити поковку за розміром і конфігурацією, що максимально наближена до готового виробу. Проте необхідність використання спеціального інструмента для кожного виробу робить цей процес доцільним лише за умов багатосерійного виробництва. Штампуванням виготовляють поковки масою до 100...200 кг (в окремих випадках — до 3 т).

Вихідні заготовки зазвичай одержують з відрізного сортового прокату різноманітного профілю. Для штампування виробів складної форми заготовку послідовно наближають до форми виробу попереднім деформуванням у так званих заготівельних рівчаків штампів, у ковальських вальцях тощо.

Розробка технології штампування починається зі створення штампа відповідно до креслення готової деталі та оптимального вибору площин роз'ємів на ньому, допусків, похилів, радіусів закруглення, розмірів. Розміри заготовки визначають виходячи з розмірів виробу і способу його штампування. Після штампування, для забезпечення точності розмірів, якості поверхні та властивостей виробу, поковку піддають обробці. До завершальних операцій відносять провідку, термічну обробку, очищення від окислів, калібровку. *Провідку* здійснюють для усунення викривлень вісі поперечних перерізів поковки. *Термічною обробкою* (відпалом, нормалізацією) знімають залишкові напруження, поліпшують оброблюваність металу різанням. Вироби очищують від жаровини барабанами, дробометальними установками, а також протравлюванням у 15...18 %-му розчині H_2SO_4 при температурі до 60 °С. Вироби калібрують у холодному або підігрітому стані.

Значна кількість способів гарячого об'ємного штампування пов'язана з різноманітністю розмірів і форм виробів, а також матеріалів для штампування. При класифікації способів штампування основною ознакою є тип штампа, який визначає характер деформування металу. Розрізняють штампування у відкритих і закритих штампах (рис. 10.9). Для штампування у відкритих штампах (рис. 10.9, а) характерним є утворення облою у проміжках між частинами штампа,

який закриває вихід з порожнини штампа основної маси металу. Надлишок металу витісняється у завершальний момент деформування. У закритих штампах порожнина під час деформування залишається закритою (рис. 10.9, б). Перевагою цього способу штампування є зменшення відходів металу, а недоліком — необхідність точного додержання рівності об'ємів заготовки і поковки.

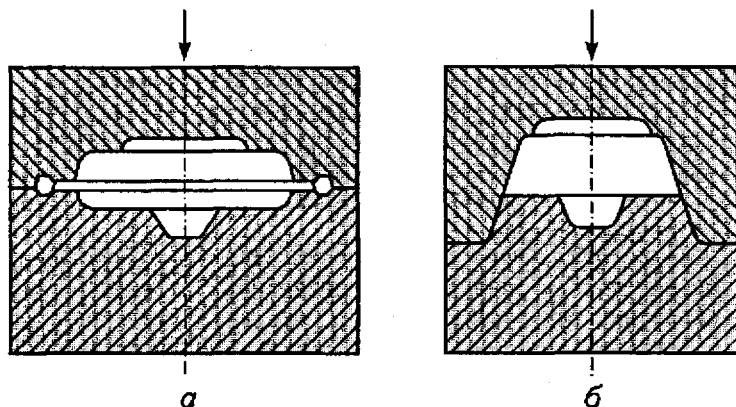


Рис. 10.9

Схеми штампування у відкритих (а) і закритих (б) штампах

Способи штампування розрізняють також залежно від обладнання, що використовується. Штампування може проводитися пароповітряними молотами, кривошипними або гідравлічними пресами, на горизонтальних кувальних машинах. Процес штампування на кожній із цих машин має свої особливості, переваги і вади. Так, кривошипні гарячештампувальні преси забезпечують вищу точність виготовлення поковок порівняно з пароповітряними штампувальними молотами. Гаряче об'ємне штампування на горизонтальних машинах є продуктивнішим і економічно доцільнішим методом обробки висадкою, а також за використання технології прошивки.

Штампування без нагрівання заготовок називають *холодним*. Таке штампування дає змогу майже повністю уникнути обробки поковок різанням, забезпечує зменшення трудових витрат на 30...80 % і підвищення коефіцієнта використання металу до 50 %. Проте застосування холодного штампування досить обмежене у зв'язку зі значними зусиллями при деформації та низькою стійкістю інструмента.

Основними видами холодного об'ємного штампування є:

- видавлювання;
- висадка;
- об'ємне формування;
- калібрування.

Холодне видавлювання аналогічне пресуванню, а решта видів холодної обробки аналогічні відповідним процесам гарячого штампування.

При холодному видавлюванні, на відміну від пресування, заготовкою є не зливочок, а пруточок, і продуктом обробки є не напівфабрикат, а готова деталь, яка потребує лише незначної обробки різанням. Цим способом одержують деталі типу стрижнів з потовщеннями, труби з фланцями, болти, клапани, стакани.

Холодну висадку застосовують для виготовлення широкого асортименту деталей серійного виробництва: болтів, гайок, гвинтів, шурупів, цвяхів, шліців тощо. Заготовкою є дріт або пруточок діаметром 0,5...38 мм. Висадку здійснюють за 1...2 переходи (удари) залежно від форми і розмірів деталей. Співвідношення довжини висаджуваної частини заготовки і діаметра має не перевищувати 2,5 при висадці за один удар і 8 — при висадці за три удари.

Холодне формування використовують для виготовлення складних за формою деталей з площею горизонтальної проекції до 5000 мм² і заввишки до 25 мм. Здійснюють її у відкритих і закритих штампах. За вихідну береться заготовка з сортового або листового прокату, а також виготовлена гарячим штампуванням або точним литтям. Холодне формування в закритих штампах застосовують здебільшого для виготовлення деталей зі сплавів кольорових металів. При формуванні деталей за декілька переходів для підвищення пластичності проводять проміжне відпалювання. Холодне формування і видавлювання здійснюють з використанням змащування.

Холодне калібрування використовують для надання виробам кінцевих точних розмірів.

Листове штампування — це метод виготовлення плоских і об'ємних виробів з листового матеріалу, стрічки або смуги з використанням штамів на пресах чи без них (безпресове штампування). Таке штампування можна здійснювати з нагріванням, проте найпоширенішим є холодне штампування смуг завтовшки 0,1...0,5 мм. Нагрівання застосовують при товщині листа більшій як 5 мм. Продуктивність листового штампування досить висока — до 40 тис. деталей за зміну.

Технологічні операції листового штампування поділяють на дві групи:

- роздільні (відрізання, вирубка, вирізування, пробивання);
- формозмінні (згинання, витягування, обтискування, формоутворення).

Відрізання здійснюють ножами на приводних паралельних гільютинах або дискових ножицях, а також на пресах з використанням штампів. Для одержання якісної поверхні зрізу зазор між різальними кромками ножів має становити 3...5 % від товщини листа.

Вирубка, вирізування і пробивання за своєю сутністю є різанням по замкненому контуру і відрізняються лише за призначенням. Для цих операцій штампи можуть бути простої дії (для виконання однієї операції) та багатоопераційні.

Під час вигину в кожному перерізі одночасно діють стисні й розтяжні напруження. Внаслідок цього пластична деформація може бути досить великою. Тому при згинанні слід враховувати кут, на який відпружинює виріб.

Витягування — це одержання порожнистої деталі замкненого контуру з плоскої листової заготовки. Цим способом можна виготовляти деталі з листа завтовшки 0,02...30 мм і розміром від десятих часток міліметра до кількох метрів. Основним параметром, що характеризує процес витягування, є коефіцієнт витягування — відношення зовнішнього діаметра деталі до діаметра заготовки (для першого проходу 0,5...0,6). Витягуванням без зменшення товщини бокових стінок одержують порожнисту деталь з листа без зміни його товщини. Витягування зі стоншуванням бокових стінок застосовують як допоміжну операцію. Допустиме зменшення товщини стінок за один прохід дорівнює 40...60 %.

Формоутворення — це загальна назва операцій, що характеризуються місцевою (локальною) зміною форми заготовки. До формоутворення відносять: • обтискування; • рельєфне формування; • розборткування тощо.

У малосерійному виробництві застосовувати складні за конструкцією штампи недоцільно. Тому для одержання порожнистих виробів використовують спрощені способи штампування: вибуховою хвилею, гумою або рідиною, електрогідравлічне, магнітно-імпульсне, ротаційне видавлювання на спеціальних верстатах або установках.

Штампкування вибухом застосовують для виготовлення великогабаритних деталей складної форми зі сплавів, що важко деформуються. Енергія вибуху передається заготовці через рідку фазу (воду) в залізобетонному басейні. Під час вибуху у воді створюється ударна

хвиля, що деформує заготовки. Швидкість деформування при цьому досягає 300 м/с. Для виробництва одиничних виробів матриця може виготовлятися з чавуну, бетону, дерева, гіпсу, картону, льоду.

Електрогідравлічне штампування подібне до штампування вибухом, але ударна хвиля при цьому створюється електричним розрядом у рідині. Такий вид штампування використовують для розвальцьовування труб апаратів високого тиску.

Магнітно-імпульсне (електромагнітне) штампування засноване на прямому деформуванні металу імпульсними електромагнітними полями. Застосовується воно для обтискування трубчастих заготовок, штампування плоских листових заготовок з електропровідних металів, а також для виконання операцій запресовки, з'єднання труб, виготовлення балонів тощо.

Ротаційне видавлювання дає можливість одержувати, як і за витягування, порожнисті деталі типу тіл обертання з листа на універсальних токарно-гвинторізних і карусельних верстатах.

§ 10.9

Обробка пластмас

При виробництві деталей з пластмас використовують різні технології, основні з яких пов'язані з застосуванням тиску. До таких технологій відносять: • гаряче пресування; • лиття під тиском; • видавлювання, або екструзію; • формування; • каландрування; • штампування та деякі інші.

Пряме (компресійне) *гаряче пресування* в основному застосовують для виготовлення деталей простої конфігурації з термореактивних пластмас та деяких видів термопластичних пластмас.

Як зазначалося вище, до композиційних термореактивних пластмас відносять полімери на основі формальдегідних, фенолформальдегідних, карбамідних, кремнійорганічних, епоксидних та інших смол з різними наповнювачами, а до термопластичних — полімери і матеріали на їхній основі, а саме: поліетилен, полівінілхлорид, фторопласти, полістирол, поліуретан тощо.

Для одержання деталей з термореактивних пластмас необхідно визначити тиск при одночасному нагріві прес-матеріалу до в'язкотекучого стану. Затверднення є результатом полімеризації з обов'язковим охолодженням деталі для збереження наданої форми. Прес-

матеріал застосовують у вигляді порошку, гранул або таблеток, що спрощує і прискорює дозування та видалення летючих речовин. Інструментом при компресійному пресуванні є прес-форма, що складається з матриці, вміщеної в спеціальну обойму пуансона, та нагрівального електричного елемента з ізоляцією. Прес-форми можуть бути гніздовими або багатогніздовими. Перед завантаженням всі форми старанно вичищують та змашують. Тиск підвищують поступово до потрібної величини, а необхідна температура підтримується за допомогою автоматичних терморегуляторів. При нагріві й стискуванні матеріалу з нього виділяються летючі речовини, волога, а у виробі утворюються тріщини, здуття, газові пузири. Для боротьби з цими шкідливими ефектами застосовують так звану підпресовку, піднімаючи пуансон на 2...4 с, даючи тим самим вихід газам і волозі. Для відповідальних деталей, наприклад текстолітових шестерень для зубчастих передач автомобілів та літаків, витримку для повного затверднення матеріалу проводять у виносних прес-формах із замком, скорочуючи час простою машини. Після витримки тиск знімають, а готову деталь за допомогою спеціального виштовхувача звільняють з прес-форми та при необхідності проводять обробні операції.

Електричний підігрів через складності з охолодженням непридатний для термопластичних пластмас. Тому як теплоносіє для них застосовують пару, а в момент охолодження по трубах подають воду.

Прес-форми виготовляють в основному зі сталей, які піддають гартуванню та хромуванню для збільшення їхньої зносостійкості.

Переведення прес-матеріалу у в'язкотекучий стан здійснюється під тиском в окремій камері поза формуючою порожниною матриці, а пуансон застосовується не для формування деталі, а для витіснення прес-матеріалу із камери завантаження. Пресування проводиться при температурі прес-матеріалу до 200 °С, тиску до 70 МПа та витримки до 1 хв на 1 мм товщини деталі.

Лиття під тиском проводиться на спеціальних автоматичних литтєвих машинах для переробки термопластів типу поліетилену, вінілпласту, полістиролу, поліамідів тощо. Лиття під тиском характеризується високою продуктивністю, оскільки процес одержання виробу триває не більше як 20 с завдяки високій текучості пластику при температурі 150...160 °С та тиску до 200 МПа. За допомогою такої технології одержують вироби складної форми з різною товщиною стінок, глибокими отворами, з різьбою та ребрами жорсткості.

Екструзію, або безперервне видавлювання, застосовують для одержання труб, стрічок, прутків тощо. При цьому прес-порошок, поступаючи з бункера екструдера (черв'ячний прес) в робочий циліндр, просувається через декілька зон підігріву, а потім пластифі-

кований матеріал видавлюють крізь отвір в мундштуці та охолоджують у спеціальних пристроях.

Тонкі плівки з поліетилену виготовляють роздувом трубної заготовки, одержаної на екструдері. Заготовка діаметром 100...900 мм з товщиною стінки 0,2...0,5 мм після роздуву перетворюється на трубну заготовку діаметром 200...2000 мм з товщиною стінки 40...200 мкм. Після охолодження трубну заготовку розрізають і змотують у рулон.

Плівку одержують і *каландруванням*. У цьому випадку розм'якшений термопластичний матеріал пропускають між валками, в результаті чого одержують нескінченну стрічку. Зазвичай застосовують багатовалкові каландри і одержують плівки завтовшки 0,05...1 мм. При цьому швидкість каландрування досягає 180 м/хв.

Целулоїдну кіно- та фотоплівку, целофан і поліамідні плівки виготовляють методом поливу. За цією технологією на рухому стрічку конвеєра через шілеподібну фільтру подається полімер, розчинений в органічному розчиннику. В спеціальній камері розчинник випаровується, а залишену плівку змотують у рулони.

У високоеластичному стані з таких термопластів, як целулоїд, органічне скло, вініпласт та інші, за технологією *штампування* виготовляють різноманітні, в тому числі й великогабаритні вироби. Процес штампування являє собою формування виробів з нагрітих листових термопластів у формах-штампах при одночасному контакті матеріалу з пуансоном та матрицею. Тиск при штампуванні листових пластиків зазвичай не перевищує 1 МПа.

При обробці подібних пластмас використовують також пневматичне та вакуумне формування. При пневматичному формуванні використовується стиснуте повітря з тиском до 2,5 МПа, а при вакуумному — атмосферний тиск і розрідження внаслідок відкачування повітря з порожнини між заготовкою та поверхнею матриці.

Контрольні запитання

1. У чому суть процесу обробки матеріалів тиском?
2. Які є види обробки матеріалів тиском?
3. Які фактори впливають на процес обробки тиском?
4. У чому полягає суть прокатування листового та профільного металу?
5. У чому суть прокатування труб?

6. У чому суть процесу волочіння?
7. У чому полягає суть процесу пресування?
8. Чим відрізняються методи прямого та зворотного пресування?
9. У чому сутність процесу та основних операцій кування?
10. У чому суть процесу штампування?
11. Чим відрізняються гаряче та холодне штампування та штампування у відкритих і закритих штампах?
12. Які є основні операції листового штампування?
13. Які є основні технології обробки пластмас тиском?

Глава 11

Технологія обробки різанням

§ 11.1

Сутність процесу, основні поняття і визначення

Обробка металів різанням — це процес зняття різальним інструментом шару металу заготовки (стружки) для надання виробу потрібної форми, заданих розмірів і чистоти поверхні. Види обробки металів різанням розрізняють залежно від конструкції різального інструмента, що застосовують, або від характеру руху інструмента і заготовки при обробці вручну чи на металорізальному верстаті.

Усі види руху при обробці різанням поділяються на три групи:

- робочий рух (або рух різання);
- установчий;
- допоміжний.

Складовими робочих рухів є *головний рух* і *рух подачі*. Головний рух здійснює процес зняття стружки, а рух подачі — процес різання. Наприклад, під час свердлення головним рухом є обертання свердла, а його переміщення вздовж осі або вбік — є рух подачі, що дозволяє одержати наскрізний отвір або канавку певної глибини.

У металорізальних верстатах головний рух найчастіше буває *обертальним* (токарні, свердлувальні, фрезерні, шліфувальні верстати) або *прямолінійним* (стругальні, довбальні верстати). Головний рух надається заготовкам (верстати токарної групи) або різальному інструменту (фрезерні, поперечно-стругальні тощо). У верстатах з головним обертальним рухом подача і різання безперервні, у верстатах з головним зворотно-поступальним — різання переривчасте.

До основних понять щодо процесу різання відносять:

- поверхні заготовки;
- координатні площини;
- елементи різальної частини;
- геометрію різця (кути, режими різання і розміри заданого шару металу).

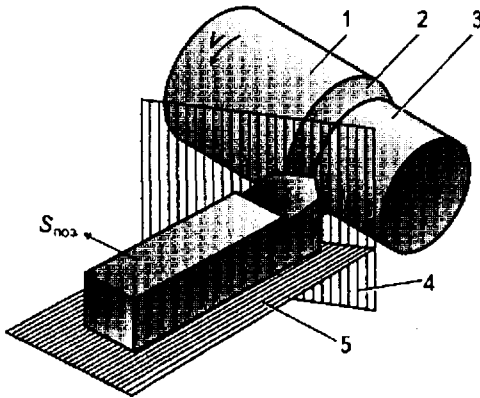


Рис. 11.1

Координатні площини і поверхні
оброблюваної заготовки

Оброблювана поверхня (рис. 11.1) — це поверхня заготовки, з якої знімають стружку (1); *оброблена поверхня* (3) — це та, з якої знято стружку; *поверхня різання* (2) утворюється головним різальним лезом різця. *Координатними площинами* називають площину різання (4), дотичну до поверхні різання, що проходить через головне різальне лезо різця, і основну площину (5), паралельну напрямку поздовжньої ($S_{\text{поз}}$) і поперечної подач.

Основні елементи різального інструмента (різця) розглянемо на прикладі токарного різця (рис. 11.2), який складається з різальної частини (II — головки) і стрижня (I) для кріплення його в державку верстата.

Елементи різальної частини різця такі: передня поверхня (1), по якій збігає стружка; вершина різця (2) — точка перетину різальних лез; головна задня поверхня (3), обернена до поверхні різання; допоміжна задня поверхня (4), повернена до обробленої поверхні заготовки; головне лезо різання (6), утворене перетином передньої (1) та головної задньої (3) поверхонь, яке здійснює основну роботу — різання; допоміжне різальне лезо (3), утворене перетином передньої і допоміжної задньої поверхонь.

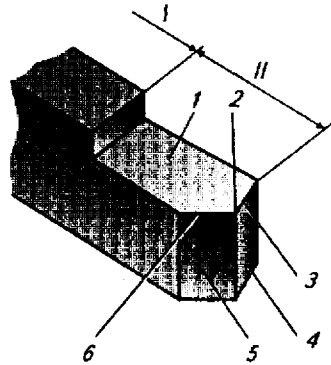


Рис. 11.2

Частина та елементи токарного
прямого прохідного різця

Форма та головні кути визначають геометричну форму різця і значно впливають на процес різання. Головні кути різця розглядають у площині перерізу А (рис. 11.3, а). Ця площина на рис. 11.3, б показана для токарного різця. На модифікаційній схемі стругання ця площина збігається з площиною креслення (рис. 11.4). Клиноподібна частина різця під дією сили P (рис. 11.4) вривається в оброблюваний матеріал. Чим гостріший клин (кут загострення), тим менші зусилля потрібні для різання. Кут загострення β — це кут між передньою і задньою поверхнями різця. На кресленнях цей кут позначають не завжди, оскільки його величину можна визначити за виразом $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$, знаючи інші кути заточування різального інструмента.

Параметри різання залежать від: • головного заднього кута (α); • переднього (γ); • головного кута в плані (ϕ) тощо. *Головним заднім кутом* (α) називають кут між головною задньою поверхнею різця і

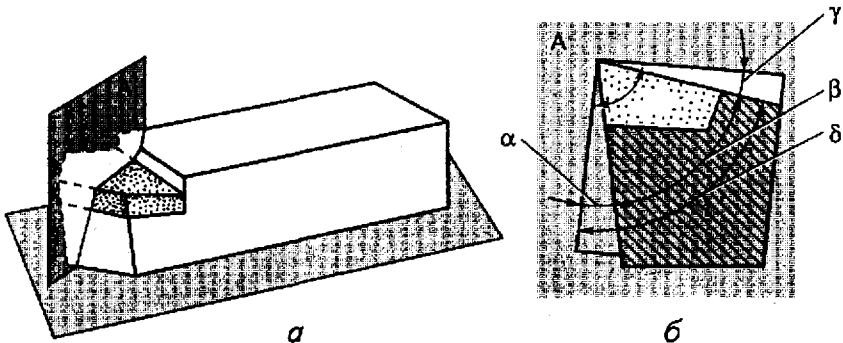


Рис. 11.3

Головні кути токарного різця

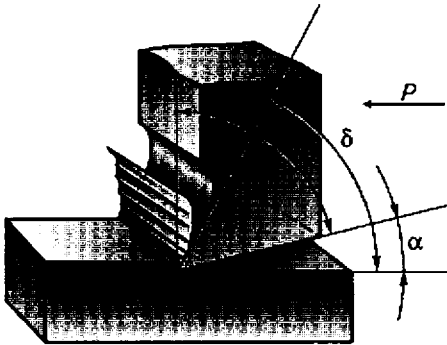


Рис. 11.4
Головні кути стругального
різця

площиною різання. Призначений він для зменшення тертя між головною задньою поверхнею різця і поверхнею різання заготовки. Кут α обирають у межах $6...12^\circ$. *Головним переднім кутом* (γ) називають кут між передньою поверхнею різця і площиною, перпендикулярною до площини різання. Від нього залежить ступінь деформації зрізуваного шару, зменшення сили тертя заготовки і передньої поверхні різця. Цей кут обирають у межах від 20° до -10° . Кут різання δ знаходиться між площиною різання і передньою поверхнею різця, визначають його за виразом $\delta = 90^\circ - \gamma$.

Кут нахилу головного різального леза λ (рис. 11.5) розміщується у площині різання між головним різальним лезом і лінією, проведеною через вершину різця паралельно основній площині. Він може бути додатнім, від'ємним, дорівнювати нулю і змінюватися від 4° до -4° . Кут λ визначає положення передньої поверхні і впливає на напрямок руху стружки.

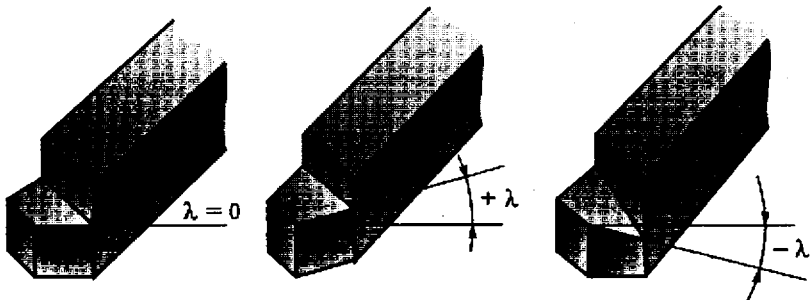


Рис. 11.5
Кут нахилу головного різального леза токарного різця

Для повної характеристики геометрії різця використовують також поняття допоміжних кутів різця α_1 , γ_1 , φ_1 і кут при вершині різця ϵ .

$$\epsilon = 180^\circ - (\varphi + \varphi_1),$$

тобто дорівнює куту між проекціями різальних лез на основну площину (рис. 11.6). Вимірюють α_1 і γ_1 (на рисунках не показано) за допоміжною січною площиною, що перпендикулярна проекції допоміжного різального леза на основну площину.

Головним кутом у плані φ називають кут між проекцією головного різального леза на основну площину і напрямком поздовжньої подачі $S_{\text{поз.}}$. Обирають його у межах $30^\circ \dots 90^\circ$ (найчастіше $\varphi = 45^\circ$). Він впливає на форму перерізу зрізаного шару, чистоту обробки і спрацювання інструмента. Допоміжний кут у плані φ_1 розташовується між проекцією допоміжного різального леза на основну площину і напрямком, протилежним напрямку поздовжньої подачі. Він також впливає на чистоту обробки поверхні.

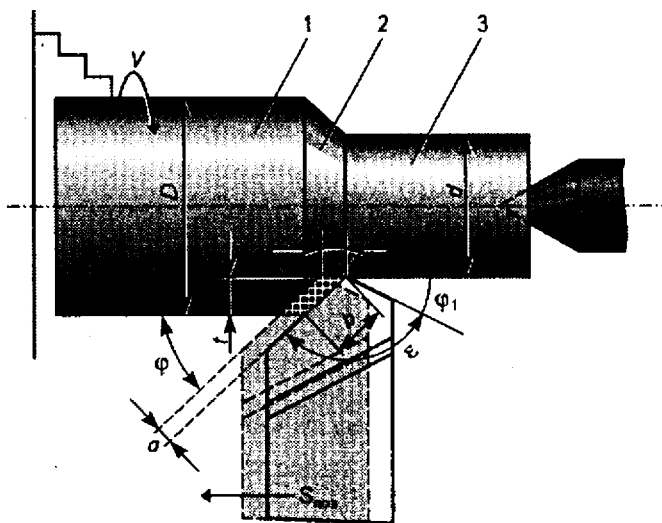


Рис. 11.6

Елементи різання і геометрія зрізувального шару металу:

- 1 — оброблювана поверхня; 2 — поверхня різання;
3 — оброблена поверхня

§ 11.2

Параметри і фізичні явища, що супроводжують процес різання

До основних параметрів процесу різання відносять глибину і швидкість різання, подачу, ширину і товщину зрізуваного шару металу та номінальну площу його перерізу.

Глибиною різання (t) називають товщину шару металу, який зрізається за один прохід різального інструмента. При повздовжньому точінні циліндричної поверхні (див. рис. 11.6)

$$t = (D - d) / 2,$$

де D — діаметр заготовки, мм; d — діаметр обробленої поверхні, мм.

Швидкістю різання (V) називають швидкість головного руху. Вона визначається шляхом, що пройшла точка оброблюваної поверхні заготовки відносно різальної кромки інструмента за одиницю часу, і вимірюється у метрах за хвилину (м/хв), крім випадків, коли швидкість різання дуже велика (шліфування). Тоді її вимірюють у метрах за секунду (м/с). За умов головного обертального руху (фрезерування, точіння, свердлення)

$$V = \pi D n / 1000,$$

де D — діаметр заготовки (або інструмента), мм; n — частота обертання заготовки (або інструмента), хв^{-1} .

Подача (S) — це переміщення різальної кромки інструмента відносно заготовки в напрямку подачі за один оберт (мм/об) або подвійний хід заготовки (чи інструмента) (мм/под. хід). Залежно від напрямку руху подача може бути поздовжньою, поперечною, похилою, вертикальною, тангенціальною, круговою тощо.

Ширина шару різання (s) — це відстань між двома послідовними положеннями різальної кромки за час повного оберту заготовки, заміряна в напрямку, нормальному до товщини шару зрізаного металу (a), де $a = s \sin \varphi$.

Номінальну площу поперечного перерізу зрізуваного шару (в квадратних міліметрах) визначають добутком подачі на глибину різання або товщини зрізуваного шару на його ширину ($f = st = as$).

Якість обробленої поверхні характеризують її шорсткість, хвилястість, наявність мікротріщин, надривів, подрібнення структури, нагартування і залишкові напруження. Шорсткість має визначальний

вплив на експлуатаційні властивості виробів — стійкість проти спрацювання, втомну міцність, корозійну стійкість тощо. *Шорсткістю* називають сукупність нерівностей поверхні деталі на певній (базовій) її довжині. Для кількісної оцінки шорсткості існують шість параметрів:

- середнє арифметичне відхилення профілю (R_a);
- висота нерівностей профілю за десятьма точками (R_z);
- найбільша висота нерівностей ($R_{\max}$);
- середній крок нерівностей;
- середній крок нерівностей за їх вершинами;
- відносна довжина профілю.

З чотирнадцяти існуючих класів шорсткості найбільш грубою і шорсткою є поверхня першого класу ($R_z = 160 \dots 320$ мкм), а найбільш гладкою — поверхня чотирнадцятого класу ($R_z < 0,1$ мкм).

Рівень шорсткості залежить від умов різання. Для зменшення шорсткості необхідно або збільшити радіус заокруглення вершини різця, або зменшити кути різця в плані.

При вдавлюванні різальної частини інструмента в оброблюваний матеріал виникає (під дією зовнішньої сили) пружно- і пластично-деформований об'єм. Це зона випереджаючої деформації або стружкоутворення, що охоплює як зрізаний шар металу, так і його частину під поверхнею, що оброблюється. Процес утворення елемента стружки можна поділити на три етапи. На першому відбувається пружне і пластичне деформування і майбутній елемент стружки зміщується в зоні стружкоутворення. На другому — елемент стружки зміщується по площині зсуву саме тоді, коли напруження у шарі перевищують опір зсуву. На третьому етапі здійснюється додаткове пластичне деформування елемента стружки, що утворився під час його руху по передній поверхні інструмента.

Залежно від умов різання і властивостей оброблюваного матеріалу може формуватися стружка трьох основних видів (рис. 11.7).

Зливна стружка (рис. 11.7, а) має вигляд суцільної стрічки з гладкою внутрішньою (біля різця) і шорсткою зовнішньою поверхнями. Границі між елементами стружки не спостерігаються.

Суставчаста стружка відколу (рис. 11.7, б) утворюється при оброблюванні менш пластичних, твердих матеріалів. Поверхня стружки біля різця також гладка, а на зовнішній поверхні видно зазубринки. Стружка складається з елементів (що не втратили зв'язку між собою) з видимими границями.

Стружка надлому (рис. 11.7, в), або елементна, утворюється при оброблюванні крихких матеріалів і складається з окремих елементів випадкової форми, не пов'язаних між собою. Таку стружку іноді називають *стружкою відриву*, оскільки її утворення викликане дією напружень розтягування.

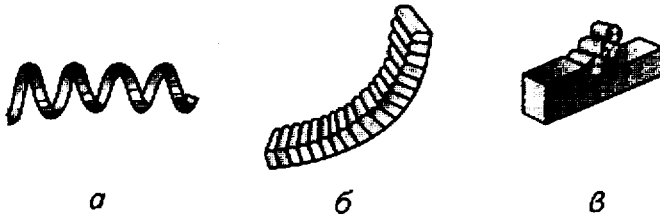


Рис. 11.7

Види стружки різання:

а — зливна; б — суставчаста; в — стружка надлому

Вигляд стружки часто використовується як непряма характеристика роботи різання. Найбільших витрат енергії потребує утворення суставчастої стружки (значний ступінь пластичної деформації), менших — утворення зливної, і найменших — утворення стружки надлому (незначна пластична деформація).

Процес різання супроводжується пружним і пластичним деформуванням зрізуваного шару, усадкою стружки, утворенням наросту на передній поверхні різця, зміцненням поверхневого шару оброблюваної деталі, тепловиділенням.

Пружне і пластичне деформування зрізуваного шару відбувається під дією нормальних і дотичних напружень при вдавлюванні різця в метал. Максимальне пластичне деформування в зоні утворення стружки, зсувні явища в зрізуваному шарі металу призводять до ковзання окремих частин зерен по кристалографічних площинах і витягування зерен. До моменту руйнування ці зерна додатково деформуються і витягуються під дією сил тертя при контакті з передньою поверхнею різця.

Усадка стружки, тобто зменшення довжини і збільшення товщини стружки порівняно з довжиною і шириною зрізуваного шару, залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, режимів різання, геометричних параметрів різця, ступеня пластичного деформування поверхневого шару деталі. Підвищення пластичності оброблюваного матеріалу збільшує усадку стружки, а застосування мастильно-охолоджувальних рідин — зменшує.

Наріст — це явище формування щільного утворення частинок металу, міцно закріплених на передній поверхні різця. Спостерігається воно під час різання пластичних матеріалів (латуні, сталі). Наріст утворюється внаслідок гальмування нижніх шарів стружки під час її ковзання по передній поверхні різця, високого тиску і значної температури в зоні контакту стружки з різцем. Метал наросту дуже деформований, твердість його значно (іноді у 2...3 рази) переважає твердість оброблюваного металу. Під час процесу різання наріст періодично руйнується, виноситься разом зі стружкою і утворюється знову. Він захищає вершину різця і різальну кромку від завчасного спрацювання, покращує тепловідбір, проте якість і точність виготовлення поверхні погіршується. Тому чистову обробку виконують ретельно доведеними різцями зі значними передніми кутами при підвищених швидкостях різання із застосуванням мастильно-охолоджувальних рідин.

Залежно від режиму різання поверхневий шар оброблюваної деталі в процесі різання деформується на глибину до 1мм. Порівняно з основним металом твердість металу поверхні може підвищуватися у 2...3 рази. Поверхнєве зміцнення може бути як корисним, підвищуючи стійкість деталі проти спрацювання і втомну міцність виробу, так і шкідливим, ускладнюючи подальшу обробку деталі різанням і підвищуючи її шорсткість.

Під час різання металів близько 95 % механічної роботи деформації і тертя переходить у теплоту, до 5 % — у скриту енергію викривлення кристалічної ґратки. Теплота, що виділяється, розподіляється між стружкою, заготовкою та інструментом. Незначна частина теплоти потрапляє до навколишнього середовища як випромінювання (у разі застосування мастильно-охолоджувальних річин) і конвенція. На температуру нагрівання різального інструмента найбільше впливає швидкість різання, менше — подача та глибина різання. Обробка різанням повинна здійснюватися без перегріву різального інструмента. Для інструменту з вуглецевої сталі температура не повинна перевищувати 200...250 °С, з твердого сплаву — 800...1000 °С, з металокераміки — 1000...1200 °С.

Теплові процеси при різанні можуть істотно впливати на якість поверхні та розміри виробів, призвести до фазових перетворень, змінювати властивості матеріалу.

Мастильно-охолоджувальні речовини застосовують здебільшого для зниження температури. Проте ці речовини не лише охолоджують, а й зменшують сили зовнішнього тертя і сприяють видаленню з зони різання стружки та продуктів зношування. Для цього використовують переважно рідини, до яких додають тверді речовини

(графіт, бітум, мило, парафін, дисульфід молібдену, соду тощо). Дуже рідко для цього використовують газ.

Найкращу охолоджувальну дію мають водні розчини з домішками 1...5 %-ї кальцинованої соди, бури, нітрату натрію тощо. Для охолодження застосовують також масляні емульсії — розчини у воді 1,5...10 %-х емульсолів (мінеральних масел з різними домішками) та масляні рідини — мінеральні масла з домішками до 30 % рослинних олив. Охолоджувальна дія масляних рідин досить низька.

§ 11.3

Стійкість і матеріали різального інструмента

Спрацювання різальної частини інструмента характеризує його здатність протидіяти мікроскопічному руйнуванню на поверхнях контакту з заготовкою та стружкою. Розрізняють кілька видів спрацювання інструмента.

Абразивне спрацювання — це механічне зношування, дряпання інструмента твердими частинками оброблюваного матеріалу, твердість яких сумірна твердості матеріалу інструмента. Цей вид спрацювання переважає при відносно невеликих швидкостях різання і під час обробки крихких матеріалів (зазвичай по основній задній поверхні інструмента).

Адгезійне спрацювання — це наслідок процесу холодного зварювання матеріалу інструмента і стружки на виступаючих ділянках площі контакту між ними з наступним відривом дрібних частинок матеріалу інструмента і виносом їх зі стружкою із зони різання.

Дифузійне спрацювання відбувається внаслідок взаємної дифузії матеріалу інструмента і оброблюваної заготовки за умови підвищення температури контактних поверхонь до 900...1000 °С.

Окисне спрацювання має місце при температурах різання 700...800 °С, коли кисень повітря вступає в хімічну реакцію з матеріалом інструмента (кобальтовою складовою твердого сплаву, карбідами вольфраму і титану).

Крихке спрацювання — це процес сколювання (викришування) макрочасток матеріалу інструмента.

У процесі різання спостерігається одночасна дія різних видів спрацювання, що визначає кінцеву стійкість інструмента за даних умов.

Стійкістю інструмента називають час його роботи за певних режимів різання між операціями його переточування. На стійкість впливають такі фактори, як хімічний склад і властивості оброблюваного матеріалу, матеріал, з якого зроблений різальний інструмент, режим різання та умови обробки. Наприклад, стійкість токарних різців зі швидкорізальних сталей у середньому дорівнює 30...60 хв, твердосплавних різців — 45...90 хв, циліндричних фрез — 180...240 хв.

Однією з основних характеристик спрацювання і стійкості інструменту є критерій затуплення — гранично допустима величина зношування, за якої інструмент втрачає нормальну працездатність (h_3). Критерієм затуплення вважають певний рівень спрацювання головної задньої поверхні інструмента, оскільки це зумовлює збільшення сил різання, тертя, підвищення температури, шорсткості оброблюваної деталі. Величина h_3 залежить від матеріалу деталі та інструмента, режиму різання, чистоти і точності обробки. Так, для токарних різців із твердосплавними пластинами за чорної обробки сталі $h_3 = 0,8...1$ мм, чавуну — $h_3 = 1,4...1,7$ мм. Для чистової обробки встановлюють технологічні критерії затуплення — такий рівень спрацювання задньої поверхні інструмента, перевищення якого призводить до невідповідності виробу технічним вимогам.

Виходячи з умов експлуатації (високі напруження і температури), матеріал різального інструменту повинен відповідати високим вимогам щодо його властивостей. Основні з них: високі твердість, стійкість проти спрацювання, теплопровідність і достатня в'язкість. Важливою характеристикою різального інструменту є також червонотривкість — здатність зберігати високу твердість за високих температур (при нагріванні до темно-червоного каління). Крім цього, матеріали для виготовлення інструменту повинні містити у своєму складі мінімальну кількість дефіцитних легуючих елементів.

Основними інструментальними матеріалами є вуглецеві та леговані інструментальні сталі, тверді металокерамічні сплави і мінералокерамічні матеріали.

Вуглецеві інструментальні сталі містять 0,9...1,3 % С (У10, У11, У12, У13). З підвищенням вмісту вуглецю твердість сталей зростає і після гартування може дорівнювати 60...63 HRC. Проте у зв'язку з низькою теплостійкістю (200...250 °С) застосування їх обмежене. З вуглецевих сталей виготовляють інструмент для невеликих (до 15...18 м/хв) швидкостей різання (плашки, розвертки, ножовочні полотна тощо).

Леговані інструментальні сталі забезпечують високу твердість і теплостійкість (250...300 °С) інструменту. Легування сталі такими

елементами, як Cr, V, Mo, W тощо, підвищує їхні міцність, прогартовуваність, зносостійкість, теплостійкість. Інструменти з легованої сталі мають кращі різальні властивості, менш схильні до деформації й тріщиноутворення під час гартування. Оскільки теплостійкість цих інструментів невисока, їх використовують при швидкостях різання, що не перевищують 25 м/хв (свердла, розвертки, мітчики, плашки, протяжки тощо).

Швидкорізальні сталі — це леговані сталі, що містять у своєму складі значну кількість вольфраму (близько 19 %), хрому (близько 4,5 %), молібдену (близько 5 %), а також ванадій, кобальт, інші домішки. Після гартування і відпуску твердість швидкорізальної сталі дорівнює 62...65 HRC, теплостійкість 650 °С, тобто червонотривкість цих сталей висока. Для економії дефіцитних і дорогих елементів інструменти з швидкорізальних сталей виготовляють з хвостовиком із конструкційної сталі. Такі інструменти можуть витримувати швидкості різання, що у 4 рази перевищують швидкість різання інструменту з вуглецевих сталей. Для виготовлення інструментів складної форми і підвищеної стійкості використовують сталі типу P18, для інструментів інших форм — сталі типу P9. Число після літери Р у марках швидкорізальних сталей означає вміст вольфраму (у відсотках). Кобальтові сталі P9K6, P9KF, PCK5F2 використовують для виготовлення інструментів, що працюють за умов переривчастого різання, вібрації, а також для обробки важкооброблюваних неіржавіючих і жароміцних сталей. Для інструментів чистової обробки використовують ванадієві сталі (P9F5, P14F4), а для чорнової обробки — вольфрамомолібденові (P9M4, P6M3, P6M5).

Тверді металокерамічні сплави мають високу твердість, стійкість проти спрацювання, міцність, теплостійкість близько 900...1000 °С. Використовують їх для високопродуктивної обробки зі швидкістю різання до 800 м/хв. Тверді сплави виготовляють спіканням при 1500...1900 °С з дисперсних порошків карбідів (WC, TiC, TaC) і порошку кобальту. Тверді сплави поділяють на три групи: вольфрамові (ВК), титановольфрамові (ТК) і титанотанталовольфрамові (ТТК). Додаткові літери В і М у кінці марки сплаву вказують на дисперсність вихідного порошку відповідно 3...5 і 0,5—1,5 мкм. Зі сплавів групи ВК виготовляють інструменти для обробки чавунів, кольорових металів і пластмас; групи ТК — для обробки сталей та інших в'язких матеріалів, зі сплавів групи ТТК — для чорнової обробки сталей. Для цього використовують і значно дешевші безвольфрамові тверді сплави (БТТС) на основі карбідів і карбідо-нітридів титану з нікель-молібденовою зв'язуючою фазою.

Мінералокерамічні матеріали забезпечують інструменту ще більші різальні властивості, високу теплостійкість і швидкість різання. Основою мінералокерамічних матеріалів є порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 , з якого шляхом пресування і наступного спікання виготовляють пластини потрібних розмірів і форми. Пластини ці закріплюють на держачах різального інструмента. Мінералокераміку використовують для чистової швидкісної обробки за умов відсутності ударних і згинаючих напружень. Добрі показники має мінералокераміка марки ЦМ-332.

§ 11.4

Металорізальні верстати

За рівнем спеціалізації металорізальні верстати поділяють на: • універсальні; • спеціалізовані; • спеціальні. *Універсальні* призначені для виконання різноманітних операцій при виготовленні деталей, різних за розмірами і формою; *спеціалізовані* — для обробки однотипних деталей різних розмірів; *спеціальні* — для виготовлення деталей одного типорозміру.

За технологічними ознаками (залежно від характеру обробки) верстати поділяють на такі групи: • токарні; • свердлильні й розточувальні; • шліфувальні, полірувальні, доводочні; • для електрофізичної й електрохімічної обробки; • зубо- і різьбообробні; • фрезерні; • стругальні, довбальні, протяжні; • розрізні; • різні.

Верстати кожної з цих груп поділяються на типи за такими основними ознаками:

- технологічне призначення (круглошліфувальні, плоскошліфувальні);
- конструктивні особливості (універсально-фрезерні, поздовжньо-фрезерні);
- розташування робочих деталей у просторі (вертикально-свердлильні, горизонтально-свердлильні);
- кількість робочих деталей верстата (одношпиндельні, багатошпиндельні);
- ступінь автоматизації (з ручним керуванням, напівавтомати, автомати).

У промисловості найпоширеніші токарні, свердлильні, фрезерні та шліфувальні верстати.

§ 11.5

Точіння

Верстати токарної групи використовують для обробки циліндричних, конічних, фасонних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь обертання, а також для обробки площин, перпендикулярних до осі обертання заготовки. Для верстатів токарної групи основним інструментом є різець. На токарно-гвинторізальних верстатах різцем наносять нарізи на циліндричних і конічних поверхнях, а також спіральні канавки на торцевих поверхнях заготовок. Для нанесення нарізів застосовують також плашки і мітчики, а для оброблення отворів — свердла, зенкери, розвертки.

У верстатах токарної групи використовується два види руху: обертальний рух заготовки (рух різання) і поступальний рух інструмента (рух подачі), що забезпечують безперервність процесу різання. Елементи режиму різання і напрямок руху під час поздовжнього точіння показані на рис. 11.1 та 11.6.

Токарні різці класифікують за різними ознаками. За матеріалом різальної частини розрізняють різці сталеві, твердосплавні і мінералокерамічні. За конструкцією різці поділяють на суцільні та складні. Залежно від розташування головної різальної кромки розрізняють різці правосторонні й лівосторонні. Під час різання правостороннім різцем (див. рис. 11.1, 11.2, 11.6) стружка зрізується з заготовки при переміщенні інструмента справа наліво. При різанні лівостороннім різцем (головна різальна кромка розташована на місці допоміжної кромки правостороннього різця) інструмент рухається зліва направо. За розташуванням осі головки різця відносно осі його тіла (в плані) розрізняють різці прямі (рис. 11.8, *a* — *e*) і відігнуті (рис. 11.8, *e*). Розрізняють також різці чистової і чорнової обробки.

Залежно від призначення (виду обробки) різці поділяють на прохідні, підрізні, відрізні, розточувальні, нарізні, канавочні, фасонні.

Прохідні різці призначені для обточування зовнішніх поверхонь (рис. 11.1, 11.2, 11.6, 11.8, *a*, *б*, *e*). Прохідні різці (прямі або упорні) з головним кутом у плані ($\varphi = 90^\circ$, рис. 11.8, *з*) застосовують для оброблення зовнішніх або торцевих поверхонь (наприклад, при виготовленні ступінчастих валів). Прохідний відігнутий різець (рис. 11.8, *e*) — універсальний, дає змогу обробляти циліндричну поверхню і підрізати торець.

Для чистової обробки застосовують різці двох типів: із заокругленою верхівкою (рис. 11.8, *д*) та широкі чистові різці з прямою

головною різальною кромкою (рис. 11.8, *е*). Перший тип застосовують для обробки порівняно невеликих поверхонь, другий — для обробки поверхонь заготовок значних розмірів.

Підрізні різці призначені для оброблювання торців, відрізні — для відрізування частини металу заготовки (рис. 11.8, *а*). Довжина головки цих різців повинна бути дещо більшою за радіус заготовки, що розрізають.

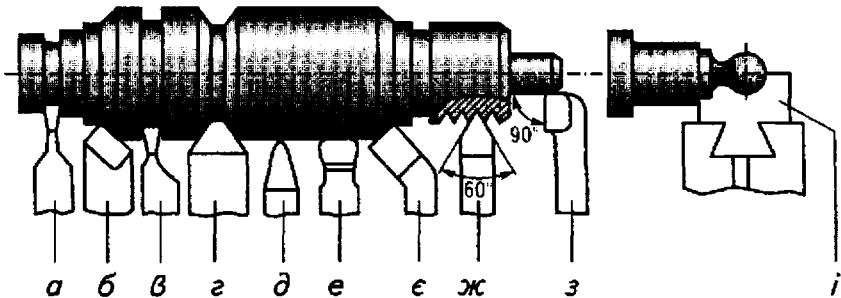


Рис. 11.8

Типи токарних різців

Розточувальні різці застосовуються при розточуванні наскрізних і глухих отворів, а нарізні — для нанесення зовнішніх (рис. 11.8, *ж*) і внутрішніх нарізів. Форма різальної кромки таких різців повинна відповідати профілю нарізу. Головні різальні кромки різця (рис. 11.8, *ж*) для нарізання симетричних нарізів заточують під кутом 60° .

Канавочні різці застосовують для прорізання канавок різного профілю: прямокутних (рис. 11.8, *е*), подібних до трапеції (рис. 11.8, *г*) тощо. Фасонні різці (рис. 11.8, *і*) застосовують для виготовлення і оброблювання складних фасонних поверхонь. Профіль різальної кромки такого різця повинен відповідати профілю оброблюваної поверхні.

До верстатів токарної групи відносяться також карусельні, револьверні, автомати та напівавтомати.

Токарно-карусельні верстати призначені для обробки важких заготовок великого діаметра і невеликої довжини, що не перевищує $0,7$ діаметра. Зазвичай це деталі типу дисків: ротори водяних та газових турбін, шків, маховики, зубчасті колеса та інші. Заготовки вставляють і закріплюють на круглому горизонтальному столі — планшайбі, яка обертається навколо вертикальної осі. На токарно-карусельних верстатах різцями можна обробляти зовнішні і внутрішні

циліндричні, конічні, фасонні та плоскі поверхні, кільцеві канавки різного профілю. Крім цього, на них також можна свердлити, зенкерувати та розвертати отвори.

На відміну від звичайних токарних верстатів багаторізцеві зазвичай мають два незалежних один від одного супорти: передній та задній. В кожному з них закріплюють по кілька різців, які працюють одночасно. Передній супорт має тільки повздовжню подачу, тому встановленими у ньому різцями обробляють тільки циліндричні поверхні. Задній супорт має тільки поперечну подачу і різцями, що встановлені в ньому, обробляє торцеві площини, канавки, короткі конічні та фасонні поверхні, фаски. На багаторізцевих верстатах обробляють заготовки різних деталей: ступінчатих валів, зубчастих коліс, дисків тощо.

Закріплюють заготовки в центрах, трикулачкових патронах, на оправках тощо. Швидко та точну установку різців при наладці верстата роблять за встановленою на верстаті перед початком роботи еталонній деталі або за шаблоном. Багаторізцеві верстати доцільно використовувати в умовах масового та багатосерійного виробництва.

Токарно-револьверні верстати призначені для обробки достатньо великих партій деталей, що мають відносно складну форму, для обробки яких необхідно послідовно застосовувати різні інструменти: різці, свердла, зенкери, розвертки, мітчики, плашки та інші. Типові деталі, що обробляються на револьверних верстатах, — це болти, гвинти, гайки, втулки, валики, різноманітні деталі арматури та інші. На відміну від токарних, у револьверних верстатів немає задньої бабки і ходового гвинта, а на поздовжньому супорті розміщена багатопозиційна револьверна голівка, до якої при наладці установлюють необхідні інструменти і при обробці вводять їх в роботу в певній послідовності.

Розрізняють револьверні верстати з вертикальною та горизонтальною віссю револьверної голівки. Залежно від типу оброблюваних заготовок розрізняють револьверні верстати для пруткових (характеризуються найбільшим діаметром прутка) та патронних (характеризуються найбільшим діаметром оброблюваної заготовки над станиною і супортом) робіт.

Токарними автоматами називають верстати, на яких після наладки обробка виконується автоматично. *Напівавтоматами* називають верстати, в яких весь цикл обробки заготовки та зупинки верстата після її закінчення виконується автоматично, а установка, зняття заготовок та пуск верстата виконується вручну. Напівавтоматами є багаторізцеві токарні верстати. На токарних автоматах обробляють кріпильні деталі, валики, втулки, кільця, деталі арматури та інше; їх

використовують зазвичай в масовому та великосерійному виробництві. На токарних напівавтоматах обробляють осі, вали, фланці, зубчасті колеса та інші деталі; застосовують їх головним чином в серійному виробництві.

Токарні автомати і напівавтомати класифікують по вигляду заготовки (пруткові та патронні), кількості шпинделів (одношпиндельні та багатошпиндельні) і по розташуванню шпинделів (горизонтальні та вертикальні).

§ 11.6

Свердління, розточування

На верстатах свердлування та розточування виконують свердлення, зенкерування, зенкування, розточування отворів різцями, розвертування, цекування, нанесення нарізу мітчиком.

Свердління — найпоширеніший спосіб виготовлення отворів у суцільному матеріалі з використанням свердла. Збільшення вже існуючих отворів свердлом називають *розсвердлюванням*. Оброблення ж циліндричних литих, штампованих або попередньо просвердлених отворів зенкером для надання їм необхідної геометричної форми, розмірів і шорсткості поверхні називають *зенкеруванням*. Зенкер, що використовується для цього, має конструктивні елементи, подібні до свердла. Відміна лише в тому, що зенкер не має поперечного леза, а різальних лез у нього не два, а три або чотири. Отвори розточуються різцями при необхідності додержання точної співвісності отворів.

Оброблювання отворів з метою отримання точних розмірів і малої шорсткості називають *розвертуванням*. Робоча частина розвертки, подібно до свердла, має заборний конус і калібруючу частину, далі за нею є ділянка зі зворотним конусом для зменшення тертя.

Зенкування — це утворення циліндричних або конічних заглиблень у попередньо зроблених отворах під головки болтів, гвинтів тощо. Здійснюють зенкування за допомогою циліндричних або конічних зенкерів (зенковок).

Цекування — це оброблення торцевих поверхонь під гайки, шайби й кільця з використанням ножів (пластин) або торцевих зенкерів.

При виготовленні нарізу в глухих отворах за допомогою мітчиків верстат додатково обладнують пристосуванням для реверсивного

(зворотного) обертання шпинделя, щоб забезпечити вилучення мітчика з нарізаного отвору. При такій обробці деталей інструменту (крім різця) надається головний обертальний рух (рух різання) і осьове переміщення (рух подачі).

При свердленні використовують такі основні типи свердел: перові, спіральні, свердла для глибокого свердління та центровочні.

Перові свердла являють собою стрижні або закріплену в оправці пластинку з ріжучими кромками, заточеними під кутом від 80° до 150° . Застосовують їх порівняно рідко — переважно при свердленні отворів в твердих поковках і відливках, обробці ступінчатих отворів.

Спіральні свердла широко використовують при роботі не тільки на свердлильних, але й на токарних, револьверних та інших метало-ріжучих верстатах. Свердла для глибокого свердлення як однолезові, так і дволезові використовуються при свердленні отворів, глибина яких перевищує діаметр у 5 і більше разів. Центровочні свердла призначені для одержання осьових гнізд в заготовках, що обробляються на токарних верстатах (у центрах).

Спіральне свердло складається з таких основних конструктивних елементів (рис. 11.9): робочої частини (I), що поділяється на різальну або заборну (II) і центруючу (III); шийки-виточки (IV) для виходу шліфувального круга; хвостовика (V) (зазвичай конічного) з лапкою (VI).

Діаметр свердла дещо зменшується у напрямку хвостовика для зниження тертя свердла по стінках отвору. Різальна частина свердла (рис. 11.9, б) складається з гвинтової канавки (1) для відведення стружки (дно канавки є передньою поверхнею головного різального леза (2); стрічки (3), що спрямовує свердло в отвір; головної задньої поверхні (4); поперечного різального леза (5).

Швидкість різання (м/хв) під час свердлення (зенкерування) отворів визначають з виразу

$$V = \pi D n / 1000,$$

де D — зовнішній діаметр свердла, мм; n — частота обертання, хв^{-1} (рис. 11.9, в).

Глибина різання при свердленні t дорівнює половині діаметра отвору: $t = D/2$, мм.

Подачу визначають за формулою

$$S_0 = C_s D^{x_s},$$

де C_s , x_s — коефіцієнти, що залежать від оброблюваного матеріалу, точності обробки і шорсткості поверхні. Значення C_s , x_s наведені у довідниках.

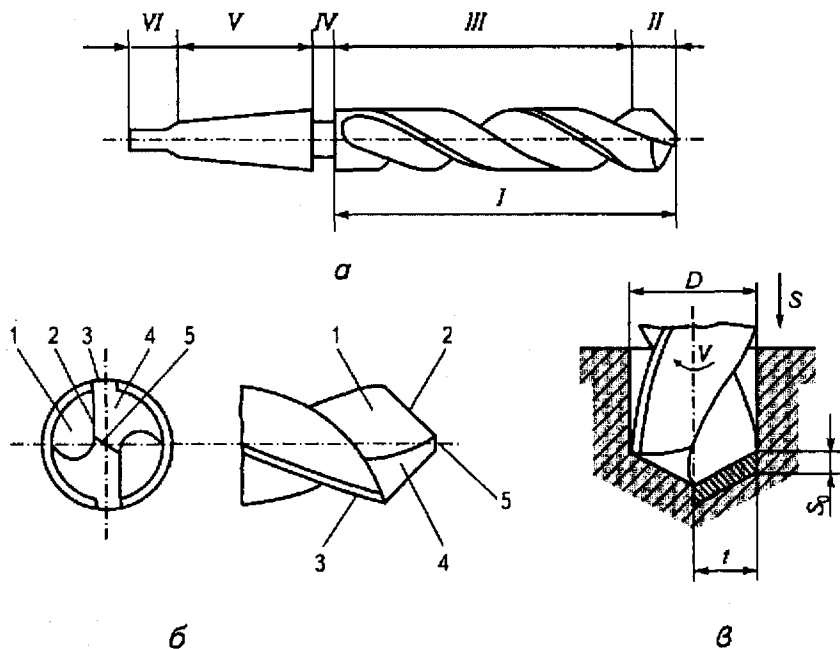


Рис. 11.9

Елементи спірального свердла (а, б) і розміри шару металу, що зрізується (в)

Основні типи свердлильних верстатів:

- вертикально-свердлильні;
- радіально-свердлильні;
- багатошпиндельні;
- горизонтально-свердлильні;
- агрегатні та інші.

Вертикально-свердлильні — це найбільш розповсюджені верстати цієї групи. Застосовують їх в одиничному та серійному виробництвах для обробки отворів в малогабаритних деталях. Основною їхньою характеристикою є найбільший діаметр отвору, який можна свердлити в сталі середньої твердості. Серійно випускають верстати з умовним діаметром свердлення 6, 12, 18, 25, 35, 50 та 75 мм.

Радіально-свердлильні верстати призначені для обробки отворів у великих та важких деталях. Осі інструмента та оброблюваного отвору

суміщаються при переміщенні шпинделя верстата відносно нерушної заготовки.

Багатошпиндельні свердлильні верстати мають декілька шпинделів, взаємне розташування яких може бути постійним або мінятися залежно від оброблюваної деталі; застосовуються в масовому та багатосерійному виробництвах.

Горизонтально-свердлильні застосовуються для свердлення глибоких отворів ($l/D > 5$). У цих випадках обертається заготовка, а свердлу передається позовжня подача.

Агрегатні верстати найбільш поширені в багатосерійному та масовому виробництвах.

Основні типи розточних верстатів:
• горизонтально-розточні; • координатно-розточні; • алмазно-розточні та інші.

На розточних верстатах свердлять, зенкерують, розточують, розвертають отвори, підрізають торці, обточують зовнішні циліндричні поверхні, нарізають різьбу, фрезерують плоскі та фасонні поверхні. Головний обертаючий рух здійснює різучий інструмент, а поступальний рух подачі — інструмент або заготовка. Залежною від форми оброблюваної поверхні подача може бути позовжною або поперечною, горизонтальною, вертикальною, радіальною. За рахунок відповідного сполучення головного руху з рухом подачі здійснюється необхідне формоутворення поверхонь.

Горизонтально-розточні верстати — це найбільш поширений тип верстатів. Вони призначені для виконання різноманітних розточних робіт, головним чином у складних та великогабаритних деталях.

Координатно-розточні верстати призначені для обробки точних отворів, осі яких повинні бути розташовані на точно визначеній відстані одна від одної або від базових поверхонь. На цих верстатах можна також свердлити, фрезерувати, а також розмічати заготовки і проводити їхні точні виміри.

Алмазно-розточні верстати призначені для тонкої розточки отворів алмазними або твердосплавними різцями в деталях порівняно невеликих розмірів. Залежно від розміщення шпинделя алмазно-розточні верстати підрозділяють на горизонтальні та вертикальні, а за кількістю шпинделів — на одно- та багатошпиндельні.

§ 11.7

Фрезерування

Фрезерування — це процес обробки металу різанням, під час якого інструмент (фреза) здійснює головний обертальний рух, а заготовка — поступальний або обертальний рух подачі. Лише в окремих випадках фреза здійснює, окрім головного, і рух подачі.

Фрезерування — один з найпродуктивніших і найпоширеніших методів обробки різанням. На фрезерних верстатах обробляють горизонтальні, вертикальні й похилі площини, фасонні поверхні; фрезерують пази і шпоночні канавки, зубці прямозубчастих й гвинтових зубчастих коліс; набором фрез обробляють складні поверхні, виконують нарізи.

Фреза — це тіло обертання, на поверхні якого розміщені різальні зубці. Залежно від форми і призначення фрези поділяють на: • циліндричні; • торцеві; • дискові; • кінцеві; • кутові; • нарізні (різьбові); • черв'ячні та інші.

За формою задньої поверхні зубців розрізняють фрези з гостро заточеними і затилованими зубцями (кут заточування відповідно до 6° і 25°). За конструктивними ознаками фрези поділяють на суцільні та зі вставними зубцями (ножами). Суцільні фрези виготовляють переважно зі швидкорізальної сталі. Корпус фрез зі вставними ножами виготовляють з конструкційної сталі, а ножі — з твердих сплавів. Залежно від способу кріплення фрез на верстаті розрізняють фрези насадні з отвором, які закріплюють на оправці, та фрези кінцеві з конічними або циліндричними хвостовиками.

Циліндричні фрези мають зуби тільки на циліндричній поверхні. Застосовуються вони для обробки площин. Суцільні гвинтові зубчасті фрези виготовляють з великими і малими зубцями відповідно для чорнового і чистового фрезерування.

Торцеві фрези також застосовують для обробки площин. Вони оснащені зубцями на торці й на боковій поверхні та можуть бути суцільними або із вставними ножами.

Кінцеві фрези застосовують для виготовлення прямолінійних пазів, канавок, для обробки площин.

Відрізні й шліцові фрези — це дискові фрези малої товщини. Вони призначені для розрізання металу і прорізування вузьких канавок (наприклад, на головках гвинтів).

Кутові фрези з зубцями на конічній та торцевій поверхнях застосовують для прорізування канавок кутового профілю. Їх широко використовують для виготовлення фрез, зенкерів, розверток тощо.

Для обробки деталей складної форми, найчастіше криволінійного профілю, використовують *фасонні фрези*. При нарізуванні зубців великомодульних зубчастих коліс застосовують *пальцеві фрези*.

Один з найпоширеніших способів обробки площин різанням пов'язаний з фрезеруванням циліндричною фрезою. Залежно від напрямів обертання фрези та подачі розрізняють *зустрічне фрезерування* при подачі заготовки назустріч обертанню фрези (рис. 11.10) та *супутнє* при збігові напрямків обертання фрези і подачі. При зустрічному фрезеруванні товщина шару металу, який зрізується зубом фрези, змінюється від нуля до найбільшого значення $a_{\max}$. При супутньому фрезеруванні товщина шару, який знімається, змінюється від $a_{\max}$ до нуля. З урахуванням особливостей врізки зуба фрези в оброблюваний матеріал рекомендують супутнє фрезерування використовувати при чистовій, а зустрічне — при чорновій обробці заготовок.

Встановити оптимальний режим різання, що впливає на продуктивність обробки, точність та шорсткість оброблюваної поверхні, можливо тільки у разі правильного вибору елементів режиму різання. Такими елементами є: глибина різання, подача, швидкість різання, ширина фрезерування (для зустрічного фрезерування циліндричною фрезою елементи режиму різання позначені на рис. 11.10, а). Глибина різання t (мм) — товщина шару матеріалу, який знімає

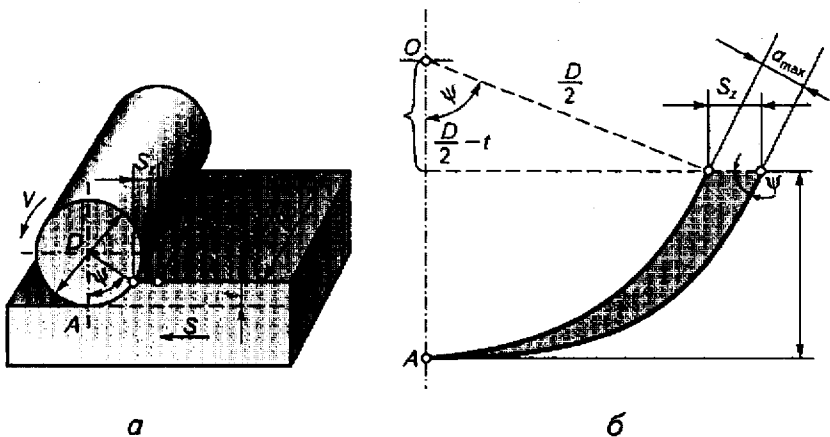


Рис. 11.10
Елементи режиму різання при зустрічному фрезеруванні циліндричною (дисковою) фрезою

фреза за один прохід, — виміряна перпендикулярно до оброблюваної поверхні. Подача — поступальне або обертаюче переміщення заготовки відносно осі фрези. При фрезеруванні розрізняють три розмірності подачі: подача на один зуб фрези S_z (мм/зуб) — переміщення заготовки відносно фрези за час її кутового повороту на один зуб; подача на один оберт фрези S_o — переміщення заготовки відносно фрези за один її оберт; подача за хвилину $S_{хв}$ — переміщення заготовки відносно фрези за хвилину.

Подачі зв'язані між собою:

$$S_{хв} = S_o n = S_z z n,$$

де z та n — відповідно кількість зубів фрези та частота обертання фрези.

Швидкість різання V (м/хв) — окружна швидкість найбільш віддаленої від осі обертання точки ріжучої кромки фрези:

$$V = \pi D n / 1000,$$

де D — діаметр фрези, мм.

Ширина фрезерування B — довжина поверхні контакту фрези з оброблюваною заготовкою, виміряна в напрямку, перпендикулярному напрямку подачі. Товщина шару, зрізаного при фрезеруванні, — це товщина шару металу, яка знімається одним зубом фрези, виміряна в радіальному напрямку (рис. 11.10, б). Зуб фрези зрізає стружку змінної товщини, для якої

$$a_{\max} = S_z \sin \psi,$$

де ψ — кут контакту.

Фрезерні верстати є найбільш поширеними металоріжучими верстатами. Існує багато типів фрезерних верстатів: консольно-фрезерні, поздовжньо-фрезерні, фрезерні верстати безперервної дії, шпоночно-фрезерні, різьбо-фрезерні, копірувально-фрезерні, спеціальні та інші. Найпоширеніші консольно- та поздовжньо-фрезерні верстати. Консольно-фрезерні підрозділяють на горизонтально-фрезерні, універсально-фрезерні, вертикально-фрезерні, широкоуніверсальні. В горизонтально-фрезерному верстаті шпиндельний вал розташований горизонтально, а в вертикально-фрезерному — вертикально. Універсальний консольно-фрезерний верстат відрізняється від горизонтально-фрезерного тим, що у нього робочий стіл може обертатися в горизонтальній площині на кут $\pm 45^\circ$. Це дає можливість

нарізати на такому верстаті зубчасті колеса з гвинтовими зуб'ями, гвинтові зуб'я в зенкерах, розвертках, фрезах тощо.

§ 11.8

Стругання, довбання, протягання

Стругання — це обробка поверхонь, яка виконується за наявності двох рухів: прямолінійного зворотно-поступального головного руху різця або заготовки в горизонтальній площині та переривчастого поступального руху подачі різця чи заготовки, перпендикулярного напрямку головного руху. При струганні процес різання переривчастий і стружка зрізається тільки при прямому (робочому) русі.

Стругальні верстати підрозділяють на два основних типи: поздовжньо-стругальні, на яких обробляють переважно середні та великі за розміром заготовки, та поперечно-стругальні, призначені для обробки заготовок при довжині стругання до 1 м. У поздовжньо-стругальних верстатів головним рухом є зворотно-поступальне переміщення стола з закріпленою на ньому заготовкою, а рухом подачі — періодичне переміщення різця в напрямку, перпендикулярному головному рухові. У поперечно-стругальних верстатах головним рухом є зворотно-поступальне переміщення різця, а рухом подачі при обробці горизонтальних площин — періодичне переміщення стола з заготовкою в напрямку, перпендикулярному напрямку руху різця. При обробці вертикальних або нахилених поверхонь періодичний рух подачі виконує супорт із закріпленням на ньому різцем.

Довбання — це вид стругання, але відрізняється від нього тим, що головний рух — зворотно-поступальне переміщення повзуна з встановленим у ньому різцем — здійснюється у вертикальній площині. Стіл верстата з заготовкою рухає подачу в горизонтальній площині в поздовжньому, поперечному або круговому напрямку. При струганні та довбанні як інструмент використовують різці. За формою стругальні різці подібні до токарних, але працюють як і довбальні, в більш тяжких умовах, оскільки в момент врзання відбувається удар. Тому їхні держакі роблять масивнішими. Залежно від розміщення ріжучої кромки стругальні різці, як і токарні, підрозділяють на праві та ліві; за виглядом обробки — на прохідні, підрізні, відрізні, фасонні, а залежно від обробки розрізняють різці чорнові та чистові.

Виготовляють стругальні різці цілісними, з привареними пластинками з швидкоріжучої сталі або з припаяними пластинками твердих сплавів ВК8, Т5К10, Т14К8 та інші. Довбальні різці, які

застосовуються для роботи на довбальних верстатах, дещо відрізняються від стругальних. Стругальні різці вигнуті назад, щоб ріжучі елементи сприймали ударні навантаження на початку робочого ходу. Довбальні різці вигнуті вперед, оскільки вони працюють при вертикальному переміщенні і деформують шар металу, який зрізають, своєю нижньою частиною. На стругальних верстатах найчастіше оброблюють площини, пази, уступи та лінійні фасонні поверхні великогабаритних або одночасно декілька оброблюваних заготовок, менших за розмірами. Довбальні верстати також застосовують для обробки внутрішніх і зовнішніх вертикальних площин, лінійних фасонних поверхонь, прорізання шпоночних та інших пазів, а також для одержання багатогранних отворів. Довбальні верстати застосовують в одиничному та малосерійному виробництвах, зазвичай при відсутності фрезерних верстатів. Стругальні верстати (особливо поздовжньо-стругальні) більш широко, ніж довбальні, використовують як в одиничному, так і малосерійному виробництвах завдяки їхній універсальності, простоті виготовлення робочого інструменту та настроювання.

Протягання — це високопродуктивний та високоточний метод обробки різанням наскрізних отворів та зовнішніх лінійних поверхонь, здійснюваний протяжками. *Протяжка* — це багатолезний різальний інструмент, форма якого відповідає формі обробленого отвору або зовнішній поверхні. Висота кожного послідовного ріжучого зуба протяжки більша за висоту попереднього, і кожний зуб зрізає з оброблюваної поверхні стружку невеликої товщини. Розрізняють внутрішнє та зовнішнє протягання. При внутрішньому протяжку протягують через попередньо оброблений отвір заготовки. Залежно від форми поперечного перерізу протяжки одержують отвори різного профілю. Протяжки для зовнішнього протягання призначені для обробки зовнішніх плоских та лінійних фасонних поверхонь порівняно невеликої ширини.

Прошивання подібне до протягання. Прошивання виконують на пресах або спеціальних верстатах, проштовхуючи крізь оброблюваний отвір заготовки. Довжина прошивки значно менша за довжину протяжки. Протягання застосовують в багатосерійному та масовому виробництвах, в деяких випадках замінюючи ним стругання, фрезерування, довбання, розвертку. Протягання — це послідовний процес зрізання припуску металу зуб'ями протяжки. Найбільш широко використовують протяжки для круглих отворів та шпоночних пазів. Виготовляють протяжки з легованих та швидкоріжучих сталей. Застосовують також плоскі та шпоночні протяжки, оснащені пластинками твердих сплавів. Для обробки циліндричних отворів іноді використовують збірні протяжки зі змінними твердосплавними ріжучою та калібровочною частинами.

Протяжні верстати класифікують за низкою ознак. Залежно від призначення їх підрозділяють на верстати для внутрішнього та зовнішнього протягання; за ступенем універсальності — на загального призначення та спеціальні; за напрямом робочого руху — на горизонтальні та вертикальні; за характером руху — на безперервної та переривчастої дії, а також на верстати з одноінструментальною та багатоінструментальною настройкою. Найпоширеніші горизонтально-протяжні верстати для обробки отворів. Основні параметри, що характеризують протяжні верстати, — це допустиме зусилля протягання та довжина ходу протяжки. У верстатах різного типу довжина ходу протяжки коливається в межах 350...2000 мм, а зусилля протягування становить 2,5...120 т.

§ 11.9

Зубонарізування

При зубонарізуванні розрізняють два основних методи профілювання бокових поверхонь зубів зубчастих коліс: копіювання та обкатки (огинання). Метод копіювання полягає в прорізанні западини фасонним інструментом, форма ріжучих лез якого відповідає обрису западини між двома сусідніми зуб'ями зубчастого колеса. При зубонарізуванні на горизонтально-фрезерному верстаті зазвичай використовують дискову модульну фрезу, а на вертикально-фрезерному — кільцеву модульну. Недоліком методу копіювання є обмежена кількість фрез у комплекті, тоді як для кожного модуля залежно від вимог до точності профілю та кількості зубів колеса, яке нарізають, необхідно мати від 8 до 26 фрез.

При нарізанні зубчастих коліс методом обкатки (огинання) профіль ріжучих лез інструмента не збігається з профілем зубів колеса, що нарізаються, а відповідає профілю зубів деякого зубчастого колеса або рейки, які називаються *виробляючим колесом* або *рейкою*, з якими колесо, що нарізається, знаходиться в зачепленні. Нарізають зуб'я зубчастих коліс за методом обкатки спеціальними інструментами на зуборізних верстатах. Найпоширеніші зубофрезерні, зубодовбальні та зубостругальні верстати. При фрезеруванні зубів на зубофрезерному верстаті як інструмент використовується черв'ячна модульна фреза. При такому методі зубонарізання для одержання циліндричного зубчастого колеса, окрім головного обертаючого руху,

фрезі треба надати також вертикального переміщення подачі, а заготовці (майбутньому циліндричному зубчастому колесу) — примусового обертаючого руху, узгодженого з обертанням фрези так, ніби вони (заготовка і фреза) були у нормальному зачепленні.

На зубофрезерному верстаті можна нарізати циліндричні зубчасті колеса з прямими та гвинтовими зуб'ями, а також черв'ячні колеса. Фрезерування циліндричних зубчастих коліс черв'ячною фрезою має значні переваги порівняно з нарізанням їх дисковими модульними фрезами: черв'ячною фрезою певного модуля можна нарізати зубчасті колеса цього модуля з якою завгодно кількістю зуб'ів; профіль зуб'ів виходить значно точнішим; продуктивність набагато вища, тим більше що цикл роботи зубофрезерного верстата напівавтоматичний.

Вельми розповсюдженим, продуктивним та точним методом створення зуб'ів циліндричних зубчастих коліс як зовнішнього, так і внутрішнього зачеплення є нарізання їх на зубодовбальних верстатах за допомогою довб'яків. Довб'як — це загартоване та одшліфоване зубчасте колесо з коригованими зуб'ями, кожен з яких має різучі кромки і необхідні кути різання (передній та головний задній). Принцип нарізання циліндричного зубчастого колеса методом обкатки за допомогою довб'яка полягає в тому, що в процесі обробки відтворюється зубчасте зачеплення двох коліс. Функцію одного з них виконує різучий інструмент (довб'як), а другого — заготовка (колесо, яке нарізають). Довб'як робить швидкий зворотньо-поступальний головний рух, що обумовлює швидкість різання. При цьому різучими кромками він відтворює в просторі уявне продукуюче колесо, з яким нібито зачеплено безазорно колесо, що нарізається. Довб'як, крім зворотньо-поступального руху, повільно обертається навколо своєї осі, роблячи кругову подачу. У взаємодії з ним обертається і заготовка. На початку нарізання довб'як, здійснюючи обертальний рух обкатки, водночас здійснює радіальну подачу до урізування на повну глибину западини, якщо колесо нарізається за одне проходження. Після урізання довб'яка на цю глибину радіальна подача припиняється. В процесі нарізання зуб'ів за цим методом профіль зуба одержується автоматично, як огибаюча крива послідовних положень різучої кромки зуба довб'яка. Довб'яком даного модуля можуть бути нарізані зубчасті колеса цього модуля з різною кількістю зуб'ів.

Вельми поширеним, продуктивним і точним методом нарізання зуб'ів конічних коліс є стругання їх на зубостругальних верстатах також за методом обкатки. Основу цього методу, як і при нарізанні циліндричних коліс за методом обкатки, становить поняття про продукуюче колесо, в зачепленні з яким нібито знаходиться заготов-

ка, що нарізається, і поза яким при нарізанні вона обкатується. Кожний зуб колеса, який нарізається, послідовно і водночас з двох сторін обробляється двома різцями, що зворотно-поступально рухаються в протилежних напрямках. При цьому їх різучі кромки відтворюють у просторі контур зуба продукуючого колеса. При повороті заготовки на певний кут навколо своєї осі різці також повертаються на такий самий кут, при цьому заготовка і продукуюче колесо, зуб якого окреслюється їхніми різучими кромками, нібито знаходяться в нормальному зачепленні. Після повної обробки конкретного зубця ділильний механізм верстата повертає заготовку на один зуб, різці займають початкове положення, оброблюється наступний зуб і так продовжується доти, поки не будуть нарізані всі зуб'я.

§ 11.10

Шліфування

На верстатах шліфувальної групи деталі обробляють методами шліфування, тонкого шліфування і точіння, хонінгування, суперфінішування, притирання, полірування, абразивно-рідкого полірування.

Шліфування — це процес обробки поверхні металу абразивним (шліфувальним) інструментом (шліфувальними кругами, брусками, шкуркою). Абразивний інструмент складається із зерен абразивного матеріалу, скріплених між собою зв'язуючою речовиною. Шліфування є основним методом одержання виробів високої точності з незначною шорсткістю поверхні та застосовується переважно для завершальної чистової обробки.

Тонке шліфування — це обробка зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь за підвищених вимог щодо точності розмірів, форми і високої чистоти поверхні. Високу точність виготовлення виробів забезпечує шліфування спеціальними м'якими вископористими кругами за рахунок зрізання дуже тонкої (5 мкм) стружки.

Тонке точіння здійснюють застосовуючи великі швидкості різання при малій товщині зрізуваного шару. Найкращим матеріалом для тонкого точіння, за умов масового виробництва виробів з кольорових металів і сплавів, вважають алмази, які характеризуються високою розмірною стійкістю. Для завершальної обробки заготовок з чорних металів застосовують різці з твердосплавними пластинами або пластинками з кубічного нітриду бору.

Хонінгування — метод завершальної обробки дрібнозернистими абразивними брусками. Такий інструмент закріплюють у спеціальній хонінгувальній головці, яка здійснює разом з ним обертальний (головний) рух і поступальне переміщення вздовж осі заготовки (рух подачі). Хонінгування застосовують здебільшого при обробці точних отворів.

Суперфінішування — метод тонкої кінцевої обробки для одержання дуже гладкої поверхні. Здійснюють, використовуючи дрібнозернисті абразивні бруски, закріплені у спеціальній головці, за умов поєднання обертального і поступального рухів головки вздовж осі оброблюваної деталі та коливального руху брусків. Така обробка забезпечує шорсткість (чистоту) поверхні $R_a \approx 0,025 \dots 0,012$ мкм.

Притирання забезпечує одержання точних розмірів (до 0,1 мкм) і дуже малу шорсткість поверхні ($R_a = 0,025 \dots 0,012$ мкм). Обробку здійснюють з використанням так званого — “притира”, на поверхню якого наносять абразивну пасту або абразивний порошок, змішаний з маслом. Притирами служать різні диски, що обертаються, плити, бруски, кільця, стрижні з чавуну, міді, свинцю, твердих порід дерева та інше. Притирання виконують на універсальних і спеціальних притирочних верстатах або вручну.

Полірування — це кінцева обробка виробів дрібнозернистим абразивом зі зв'язкою (оливою, сумішшю воску, парафіну, сала з гасом), нанесеного на поверхню круга, диска або стрічки з м'якого еластичного матеріалу. Деталі після полірування добре працюють у потоках газів або рідини, іноді полірування використовують як попередню обробку декоративних виробів або перед нанесенням гальванічних покриттів.

Абразивно-рідке полірування з використанням водно-абразивної суспензії (подають під тиском до 0,3 МПа на оброблювану поверхню) застосовують для кінцевої обробки фасонних деталей. Шорсткість поверхні за такого полірування залежить від зернистості абразиву.

Серед наведених методів обробки металів найпоширенішим у виробництві є шліфування.

Залежно від характеру шліфувальних робіт верстати поділяють на такі основні типи:

- круглошліфувальні — для обробки зовнішніх поверхонь обертання;
- внутрішньо-шліфувальні — для обробки внутрішніх поверхонь обертання;
- плоскошліфувальні — для обробки площин;

- спеціальні (шліцешліфувальні, зубошліфувальні, різешліфувальні та інші);
- заточувальні — для заточування інструмента.

Найпоширеніші кругло- й плоскошліфувальні верстати.

Залежно від форми деталей, при обробці поверхонь застосовують різні схеми (види) шліфування:

- кругове зовнішнє з поздовжньою подачею;
- кругове зовнішнє з радіальною подачею;
- внутрішнє;
- плоске периферією круга на верстатах з прямокутним столом;
- плоске торцем круга на верстатах з прямокутним столом;
- плоске периферією круга на верстатах з круглим столом;
- плоске торцем круга на верстатах з круглим столом;
- безцентрове з поздовжньою подачею;
- безцентрове з радіальною подачею.

Найпоширеніші схеми кругового і плоского шліфування.

Під час кругового зовнішнього шліфування з поздовжньою подачею (рис. 11.11, а), як і при інших видах шліфування, головний рух зі швидкістю $V_{кр}$ здійснює шліфувальний круг. Заготовка обертається зі швидкістю V_3 і поступально переміщується вздовж осі ($S_{поз}$ — поздовжня подача). Поперечну подачу S_n на глибину шліфування t шліфувальний круг здійснює наприкінці поздовжнього ходу в напрямку, перпендикулярному осі заготовки.

При шліфуванні з поперечною подачею (врізання) шліфувальний круг (рис. 11.11, б) робить обертальний рух зі швидкістю $V_{кр}$ і поперечне переміщення S_n , а заготовка — тільки обертальний рух V_3 . Ця схема застосовується при шліфуванні циліндричних, конічних і фасонних поверхонь, ширина яких менша за ширину круга.

При внутрішньому шліфуванні (рис. 11.11, в) основним робочим рухом є обертання шліфувального круга зі швидкістю $V_{кр}$, який здійснює також і зворотно-поступальне переміщення зі швидкістю поздовжньої подачі $S_{поз}$ і періодично, в кінці ходу, поперечну подачу S_n на глибину різання t . Заготовка обертається в напрямку, протилежному напрямку обертання шліфувального круга зі швидкістю V_3 , яка у кілька разів менша за швидкість обертання шліфувального круга.

При плоскому шліфуванні периферією (рис. 11.11, з) або торцем круга заготовка, що закріплена на столі, робить обертально-поступальний рух поздовжньої подачі $S_{\text{поз}}$. Шліфувальний круг, окрім головного руху зі швидкістю $V_{\text{кр}}$, здійснює в кінці поздовжнього ходу поперечну подачу $S_{\text{п}}$, а після шліфування всієї площини — вертикальне переміщення $S_{\text{в}}$ на глибину різання t .

Основні елементи різання — швидкість, подача і глибина різання — наведено на рис. 11.11. Швидкістю різання для всіх видів шліфування є швидкість $V_{\text{кр}}$ (м/с) шліфувального круга, що робить

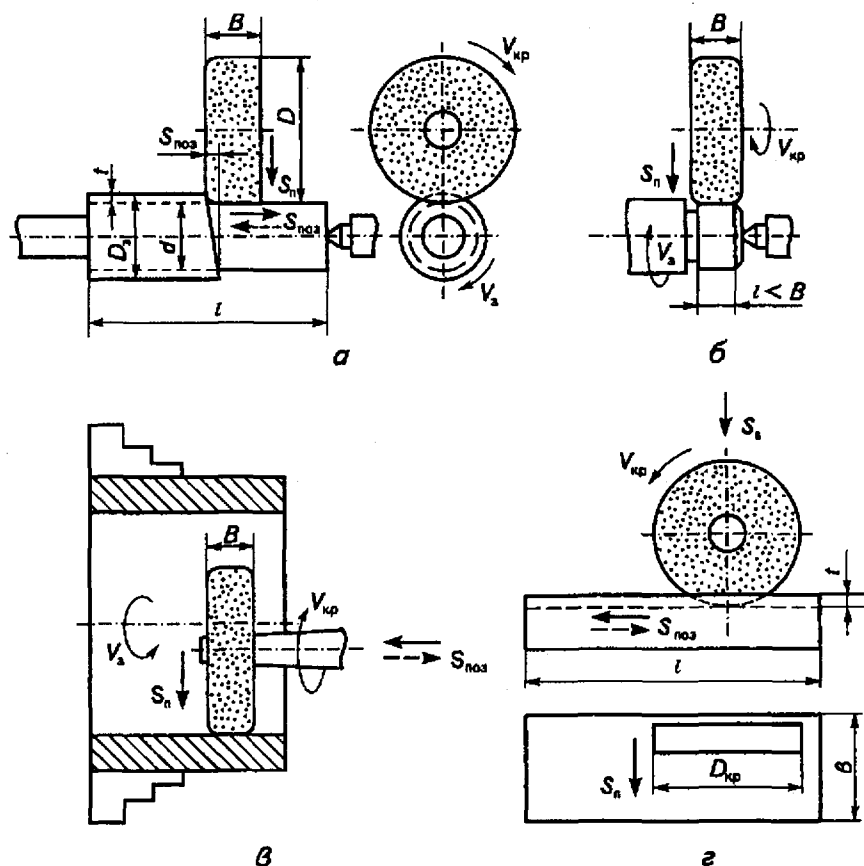


Рис. 11.11
Схеми кутового (а — б) і плоского (з) шліфування

головний рух. При круговому шліфуванні елементами різання є кругова швидкість заготовки, поздовжня і поперечна подачі (рис. 11.11, а). *Кругова швидкість заготовки* V_z (м/хв) — це кругова подача. *Поздовжня подача* $S_{\text{поз}}$ (мм/об) — це переміщення заготовки відносно шліфувального круга за один оберт. *Поперечна подача* $S_{\text{п}}$ — це величина переміщення шліфувального круга в напрямку, перпендикулярному осі заготовки в крайніх її положеннях. Вона визначає товщину шару металу, що знімається за один прохід, і чисельно дорівнює глибині різання t . При плоскому шліфуванні, крім швидкості різання $V_{\text{кр}}$, елементами режиму різання є поздовжня $S_{\text{поз}}$, поперечна $S_{\text{п}}$ і вертикальна $S_{\text{в}}$ подачі (рис. 11.11, з).

Продуктивність і якість обробки шліфуванням залежить не тільки від ширини круга B та діаметра $D_{\text{кр}}$, а також і від параметрів, які характеризують абразивний інструмент. Однією з найважливіших характеристик абразивного інструменту є зернистість (величина зерна) абразиву. Залежно від розміру зерна абразиви позначають номерами. Грубозернисті (2000...160 мкм) мають номери від 200 до 16, їх називають *шліфувальними зернами*. Більш дрібні, з розміром зерен 125...28 мкм (*шліфувальні порошки*), позначають номерами від 12 до 3. Мікропорошки з розміром зерен від 40 до 3 мкм позначають номерами від М40 до М5.

Алмазні матеріали за розміром зерна поділяють на дві групи:

- шліфувальні порошки;
- мікропорошки.

Їхня зернистість позначається дробом, в якому чисельник відповідає найбільшому розмірові зерна основної фракції, а знаменник — найменшому. Шліфувальні порошки мають номери від 630/500 до 50/40 мкм, мікропорошки — від 60/40 до 1/0 мкм.

Важливою характеристикою абразивного інструменту є також зв'язуюча речовина (неорганічна, органічна, металева), що об'єднує абразивні зерна в одне ціле. На практиці широко застосовують інструмент з використанням неорганічної зв'язуючої речовини на основі вогнетривкої глини — керамічний (К), на основі синтетичної смоли — бакелітовий (Б), на основі каучуку та сірки — вулканітовий (В). Металеві зв'язуючі речовини складаються з металевої основи (порошки Sb, Al, Cu та інші) та наповнювача. Застосовують їх переважно в алмазних кругах.

Параметром, що характеризує абразивний інструмент, є твердість. Цей показник визначає опір зв'язуючої речовини видаленню зерен абразиву під дією зовнішньої сили. Розроблено шкалу, що має сім

класів твердості (вони також поділяються на кілька ступенів): Т — твердий, ВТ — вельми твердий, ДТ — дуже твердий.

Структуру абразивного інструменту оцінюють за співвідношенням (в %) об'ємів, зайнятих зернами абразиву, зв'язуючою речовиною і порами. Змінюючи ці співвідношення, одержують абразивні круги різної структури і властивостей. Розрізняють 12 номерів структур. Найменшій пористості відповідає найбільший номер. Тип шліфувальних кругів характеризується також формою. Так, круги прямого профілю позначають ПП.

Регламентована швидкість різання керамічними і бакелітовими кругами до 35 м/с, а вулканітовими — 40 м/с.

Основні характеристики відображено у маркуванні абразивних матеріалів. Так, круг марки 24А10ПС27К5, ПП500х50х305 розшифровують так: 24А — вид абразивного матеріалу (електрокорунд білий); 10П — зернистість (П — вміст основної фракції зерен); С2 — ступінь твердості; 7 — номер структури; К5 — вид керамічної зв'язуючої речовини; ПП — форма круга (прямий, плоский); 500 — зовнішній діаметр, мм; 50 — ширина, мм; 305 — діаметр отвору, мм.

§ 11.11

Поверхнєве пластичне деформування

При механічній обробці поверхонь металовиробів використовують зміцнювально-калібрувальні методи, до яких відносять обкатку зовнішніх та внутрішніх поверхонь роликми, калібрування отворів та дробоструминну обробку.

Процес обкатки полягає в тому, що поверхню оброблювальної деталі обкочують притиснутими до неї одним, двома або трьома гладкими роликми, виготовленими із загартованої сталі. В цьому процесі поверхня вигладжується та наклепується. Обкаткою в ряді випадків замінюють менш продуктивну операцію шліфування.

Отвори калібрують на протяжних верстатах та пресах за допомогою спеціального інструмента (дорна) або з допомогою кульки. Процес дорнування полягає в тому, що калібрувальний дорн (прошивка або протяжка певної довжини, що не мають різальних зуб'їв) проштовхується або протягується крізь оброблюваний отвір. Розміри отвору мають бути трохи меншими за калібрувальний дорн.

При дорнуванні за рахунок пластичних деформацій діаметр отвору збільшується і шорсткість згладжується. *Калібрування кулькою* полягає в продавлюванні крізь попередньо точно оброблений отвір сталюї загартованої кульки також трохи більшого діаметру, ніж отвір. Цей спосіб вельми ефективний при калібруванні отворів з криволінійною віссю.

Дробострумний обробці зазвичай піддають деталі складної форми, які пройшли механічну та термічну обробку. Сутність процесу в тому, що оброблювана поверхня піддається ударам сталюого або чавунного дробу, який спрямовується на неї зі спеціального дробомета. Така обробка спричиняє пластичну деформацію та наклеп поверхневого шару деталі, в якому створюються сприятливі напруження стискування. Вся поверхня деталі покривається дрібним ряботинням від удару дробинок. Дробострумна обробка вельми ефективна при виготовленні деталей, які працюють при знако-перемінних навантаженнях. У такий спосіб обробляють ресори, пружини, шатуни, колінчасті вали, зубчасті колеса тощо.

Контрольні запитання

1. У чому полягає сутність процесу різання?
2. Які явища супроводжують процес різання?
3. З якого матеріалу виготовляють різальний інструмент?
4. У чому сутність процесу точіння?
5. У чому полягає суть процесів свердлування та розточування?
6. У чому полягає суть процесу фрезерування?
7. У чому сутність процесів стругання, довбання, протягання?
8. У чому сутність процесу зубонарізання?
9. У чому полягає суть процесів шліфування?
10. Які є методи обробки поверхонь пластичним деформуванням?

Глава 12

Технологія зварювання

§ 12.1

Сутність процесу і класифікація способів зварювання

Зварюванням називають технологічний процес утворення нероз'ємних з'єднань металевих виробів, що здійснюється при використанні міжмолекулярних і міжатомних сил зчеплення. Для виникнення цих зв'язків зварювані поверхні необхідно наблизити до відстані, відповідної атомному радіусу. Це можливо лише за умови усунення причин (мікронерівності, оксидні та органічні плівки, адсорбовані гази), що заважають зближенню, і надання атомам певної енергії (енергії активації). Енергія ця може передаватися у вигляді теплоти (термічна активація) та пружно-пластичної деформації (механічна активація). Відповідно до цього всі способи зварювання поділяють на дві основні групи:

- зварювання плавленням;
- зварювання тиском (пластичним деформуванням).

При зварюванні плавленням по кромках, що з'єднуються, розплавляють або тільки основний метал, або основний і додатковий (електродний або присадний). Для розплавлення основного і присадного металів необхідно, щоб температура становила понад 2500 °С.

Розрізняють *електричне* і *хімічне зварювання плавленням*. При електричному зварюванні плавленням джерелом енергії є електричний струм. Таке зварювання поділяють на *дугове, електрошлакове, електронно-променеве, плазмове, лазерне* тощо. Залежно від рівня механізації зварювання може бути ручним, автоматичним, напів-автоматичним.

При зварюванні тиском у процесі пластичної деформації в поверхневих контактуючих шарах вирівнюються мікронерівності, руйнується адсорбований шар і збільшується кількість активних центрів взаємодії. Внаслідок цього між атомами поверхонь утворюється металевий зв'язок. Зварювання тиском здійснюють з попереднім нагріванням (контактне, індукційне, дифузійне) або без нього (холодне, ультразвукове, вибухом, тертям).

Найпоширенішим способом зварювання є дугове, джерело енергії якого — зварювальна дуга. *Зварювальною дугою* називають стаціонарний електричний розряд у газопаровій атмосфері між електродами, що перебувають під напругою. Відстань між електродами називають *областю дугового розряду*, або *довжиною дуги* (приблизно дорівнює діаметрові електрода). Запалювання дуги при зварюванні починається з короткого замикання електрода з виробом або з високочастотного електричного розряду (в разі використання неплавких електродів). Зварювальна дуга як концентроване джерело енергії забезпечує температуру стовпа дуги 6000...7000 °С і температуру катодної і анодної плям, відповідно, 2400...2600 °С. У рівноважному стані залежність між напруженням і струмом виявляє статична вольт-амперна характеристика дуги, що складається з трьох ділянок: *спадаючої, жорсткої й такої, що зростає*. Найчастіше використовують ділянку дуги з жорсткою характеристикою.

Зварювальну дугу можна живити постійним струмом (від генераторів і випрямовуючих установок) або змінним (від зварювальних апаратів чи трансформаторів). При зварюванні напруження на дузі має бути мінімальним. Тому потужність дуги регулюють зміною сили струму, керуючи вольт-амперною характеристикою.

Джерела зварювального струму мають відповідати таким вимогам: легке запалювання дуги і безпечність роботи (напруження холостого ходу має бути не більше 60...80 В); стабільне горіння дуги за заданим режимом; варіювання (регулювання) сили струму; обмеження струму при короткому замиканні зварювальної мережі (струм короткого замикання має не перевищувати робочий струм більше ніж у 1,5 рази).

Для виконання цих вимог найчастіше використовують джерело перемінного або постійного струму з напругою холостого ходу 60...80 В зі спадною вольт-амперною характеристикою регульованої крутизни.

§ 12.2

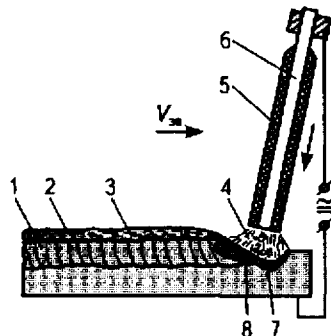
Ручне і автоматичне дугове зварювання

Зварювальне обладнання ручного дугового зварювання складається з джерела живлення дуги, зварювальних провідників, електродотримача й електродів. При зварюванні неплавкими електродами застосовують вуглецеві (графітові) електроди діаметром 6...30 мм і завдовжки 200...300 мм або вольфрамові електроди (при зварюванні в інертних газах) діаметром 1...6 мм. Для зварювання плавкими електродами з покриттям використовують металеві електроди діаметром 1,6...12 мм і завдовжки 150...450 мм.

Рис. 12.1

Схема зварювання електродом з покриттям:

- 1 — зварний шов; 2 — тверда шлакова кірка;
3 — рідка шлакова ванна; 4 — газова захисна атмосфера;
5 — покриття електрода; 6 — стрижень електрода;
7 — зварювальна дуга; 8 — рідка металева ванна



Під час ручного зварювання зварник маніпулює електродом, підтримуючи задану довжину дуги, подає електрод у дугу, а також переміщує його вздовж заготовки. Схема зварювання електродом із покриттям наведена на рис. 12.1. До складу покриття входять:

- стабілізуючі (іонізуючі);
- газоутворюючі;
- шлакоутворюючі;
- розкислювальні;
- легуючі компоненти.

Стабілізуючі — це сполуки лужних і лужноземельних металів (наприклад крейда).

Газоутворюючі компоненти сприяють формуванню захисного газового середовища (деревне і харчове борошно, целюлоза тощо).

Шлакоутворюючі компоненти захищають електродний метал, метал зварювальної ванни та гарячого шва від впливу повітря (оксиди

металів та неметалів — марганцева руда, титанова руда, каолін тощо). *Розкислювальні* компоненти — це сполуки, що мають більшу спорідненість із киснем. Вони необхідні для видалення кисню з ванни і шлаків (феромарганець, феротитан, феросиліцій тощо). *Легуючі* компоненти застосовують для одержання необхідного хімічного складу і властивостей зварного шва.

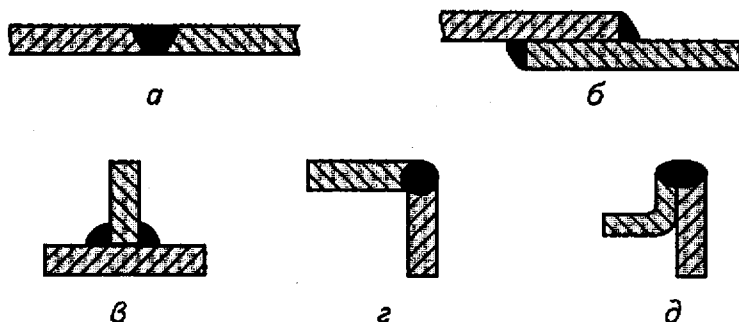


Рис. 12.2

Основні типи зварних з'єднань:

а — встик; б — напуск; в — таврові; г — кутові; д — торцеві

Ручне електродугове зварювання ефективне при одержанні всіх типів зварних з'єднань (рис. 12.2) і особливо при зварюванні коротких, переривчастих швів у важкодоступних місцях, у різних просторових положеннях (рис. 12.3) за умов ремонту, дослідного виробництва, монтажу та будівництва. При такому зварюванні об'єм рідкого металу зварювальної ванни незначний, тому може утримуватись

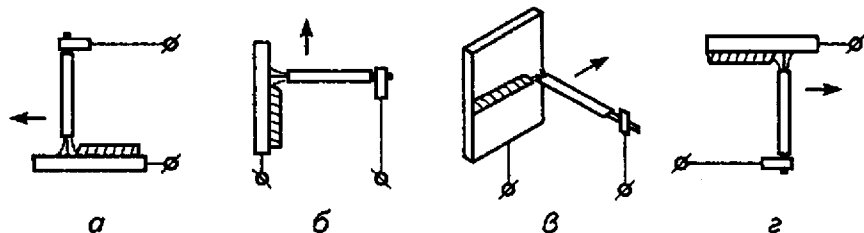


Рис. 12.3

Розміщення швів у просторі:

а — нижні; б — вертикальні; в — горизонтальні; г — стельове

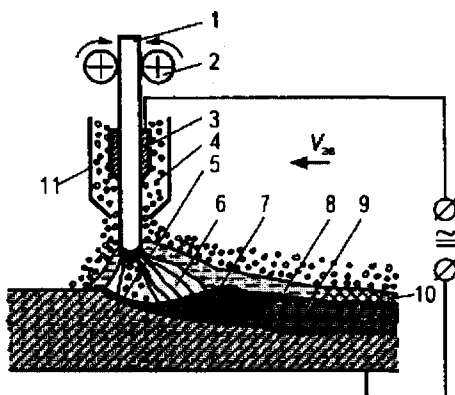
навіть на вертикальній (рис. 12.3, *в*) або стельовій (рис. 12.2, *г*) площині за рахунок сил поверхневого натягу.

До недоліків цього способу зварювання відносять важкі умови праці (працювати доводиться із захисною маскою) і низьку продуктивність (швидкість зварювання становить декілька метрів за годину).

Рис. 12.4

Схема автоматичного зварювання під флюсом:

- 1 — електрод; 2 — механізм подачі дроту;
- 3 — провідник струму; 4 — флюс;
- 5 — основний метал; 6 — зварювальна дуга; 7 — зварювальна ванна;
- 8 — шлакова ванна;
- 9 — зварювальний шов;
- 10 — шлакова кірка;
- 11 — бункер



Під час автоматичного зварювання під флюсом забезпечується автоматичне запалювання і підтримується стабільний режим горіння дуги. Подача електродного дроту і переміщення електрода механізовані (рис. 12.4).

При зварюванні під флюсом дуга збуджується між електродом (1) і основним металом (виробом) (5), і горить під шаром флюсу (4), який надходить в зону зварювання з бункера (11). Частина флюсу, що оточує дугу, розплавлюється, утворюючи на поверхні розплавленого металу (7) ванну рідкого шлаку (8). При переміщенні дуги метал зварювальної ванни кристалізується з утворенням шва (9), покритого кіркою (10), що легко відділяється. Флюс захищає дугу і зварювальну ванну від окислення з атмосфери, забезпечує нормальне формування шва, запобігає розбризкуванню металу. Крім цього, струм можна підводити безпосередньо до дуги, що дозволяє різко збільшити його щільність (струм зварювання до 3000 А та більше). Складовими флюсу, залежно від способу зварювання, є оксиди кремнію, титану, кальцію, магнію, марганцю, заліза, а також фтористі й хлористі сполуки (плавиковий шпат, силікат марганцю тощо).

Автоматичне зварювання, порівняно з ручним, уможливорює зменшення витрат електродного металу в два рази, підвищення про-

дуктивності від 3 до 20 разів, поліпшує умови праці. Його застосовують для зварювання однотипних вузлів з довгими прямолінійними та кільцевими швами, листових конструкцій з різних сталей і сплавів кольорових металів.

Напівавтоматичне зварювання відрізняється від автоматичного тим, що подача електродного дроту механізована, але переміщення його вздовж шва здійснюється вручну. Зварювальну ванну при цьому захищають флюсом або захисним газом (аргоном, гелієм, двоокисом вуглецю). Напівавтоматично зварюють короткі та криволінійні шви, які недоцільно зварювати автоматичним зварюванням.

§ 12.3

Електрошлакове зварювання

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) — це процес з'єднання металів, при якому розплавлення зон зварювання основного й електродного металів здійснюється теплотою, що виділяється при проходженні електричного струму через шлакову ванну (рис. 12.5). Шлакова ванна (2) утворюється за допомогою зварювальної дуги на початку зварювання. Подаючи флюс до дуги, створюється значний шар електропровідного шлаку, після чого дуга занурюється в шлак, стає довшою і нестабільною. Це призводить до припинення дугового розряду і замикання струму у зварювальному ланцюгу. Рідкий шлак нагрівається при проходженні електричного струму. Плавлення електродного дроту (3), пластини або спеціального мундштука, що подаються до зварювальної ванни (4), забезпечує теплопередачу (до 2000 °С) шлаку. Частина теплоти витрачається також на оплавлення кромки (б) зварюваних заготовок (Л).

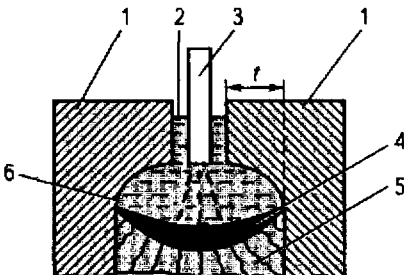


Рис. 12.5

Схема електрошлакового
зварювання:

- 1 — зварюваний метал; 2 — шлакова ванна;
- 3 — електродний дріт; 4 — металева ванна;
- 5 — зварювальний шов; 6 — величина (l)
проплавлення кромки металу

Процес ЕШЗ можливий при вертикальному розташуванні шва і швидкості зварювання до 5 м/год. Витрати на 1 м шва, порівняно з автоматичним дуговим зварюванням під флюсом, приблизно у 10 разів менші за рахунок підвищення продуктивності (в 20 разів), скорочення витрат флюсу (в 20...30 разів) і спрощення підготовки кромки. ЕШЗ застосовують для з'єднання товстолистових (понад 20 мм) заготовок, виливків, поковок і зливків чавуну, сталі, сплавів кольорових металів. Зварювальні з'єднання при цьому можуть бути фігурними, криволінійними, перемінного перерізу. Цей вид зварювання застосовують для виготовлення великогабаритних конструкцій, порожнистих і суцільних валів, механічних і гідравлічних пресів та прокатних станів.

§ 12.4

Дугове зварювання в захисній атмосфері, плазмодугове зварювання

При зварюванні в захисній атмосфері зварювальну дугу, основний метал і електрод захищають в атмосфері газу в камері або струменем газу, який подають до місця зварювання спеціальним пальником. Для зварювання використовують плавкі й неплавкі (вуглець, вольфрам) електроди, постійний і перемінний струм прямої (мінус на електроді) й зворотної полярності. Захисні атмосфери можуть бути інертними (аргон, гелій) або активними (вуглекислий газ, азот, водень). Оскільки інертні гази не взаємодіють з металом і не розчиняються в ньому, хімічний склад шва і зварюваного металу однаковий, що забезпечує високу якість зварювальних з'єднань. Інертні гази застосовують для зварювання легованих сталей і сплавів на основі Ti , Zr , Nb , Al , Mg завтовшки 0,1...100 мм. Найпоширеніше аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом. Частіше застосовують дугу постійного струму прямої полярності. Завдяки цьому значна більшість теплоти дуги витрачається на розплавлення основного металу. Проте дуга зворотної полярності має дуже важливу властивість — здатність очищати поверхню металу від окисних і нітридних плівок та інших забруднень. Відбувається це очищення тому, що у зоні катодної плями на поверхні виробу завдяки катодному розпиленню під дією бомбардування позитивними іонами руйнуються оксидна та нітридна плівки та видаляються інші забруднення.

Цю властивість дуги зворотної полярності використовують для зварювання (на змінному струмі електродом, що не плавиться) алюмінія, магнія та інших сплавів, поверхня яких вкрита тугоплавкою плівкою окислів і нітридів, що не розплавлюються і тим самим перешкоджають з'єднанню кромek зварюваних елементів. Змінний струм дає змогу в одному з напівперіодів очищати поверхню, а в іншому — розплавляти основний метал і зменшувати нагрів вольфрамового електрода.

Якісні з'єднання низки сплавів одержують також і в середовищі активних газів, які взаємодіють з металом зварювальної ванни. Так, більшість марок конструкційних сталей зварюють у середовищі вуглекислого газу. Надходячи в зону високих температур дуги, він частково дисоціює з виділенням атомарного кисню. Для захисту від окислення застосовують зварювальний дріт із підвищеним вмістом Si і Mn (1...2 %), які відновлюють оксиди заліза. При цьому продукти реакції спливають на поверхню шва у вигляді шлаку. Під час такого зварювання найчастіше використовують дугу зворотної полярності.

У разі зварювання в захисній атмосфері об'єм ванни невеликий і вона швидше охолоджується. Це дає змогу, на відміну від зварювання під флюсом, здійснювати процес у вертикальному та перевернутому положеннях, що вельми важливо при зварюванні труб устик автоматичною зварювальною головкою.

При плазмодуговому зварюванні металу джерелом теплоти є струмінь газу, іонізованого в дузі, яка під час зіткнення з менш нагрітим тілом деіонізується з виділенням значної кількості теплоти. Це дає підставу вважати її самостійним джерелом нагрівання. Температура струменя плазми залежить від ступеня іонізації газу. Для її підвищення використовують стовп стиснутої дуги, тобто дуги, що горить у вузькому каналі, через який під тиском подають газ (аргон, азот, водень), тим самим збільшуючи ступінь обтискування. За таких умов температура газу в стовпі дуги досягає 30 000 °С. Генератор плазми (іонізованого газу) називають *плазмотроном*. Останнім часом створено плазмотрони, в яких замість аргону і аргоно-водневої суміші застосовують дешевший вуглекислий газ.

Є два варіанти використання струменя плазми: • суміщений з дугою, яка горить між вольфрамовим електродом (катодом) і виробом (анодом); • відокремлено від дуги. За першим варіантом здійснюють термічне різання, за другим — зварювання, наплавлення і напилення. Останній варіант застосовується також для роботи з неелектропровідними матеріалами. При цьому швидкість плазмового зварювання вуглецевих сталей досягає кількох сотень метрів за годину.

§ 12.5

Зварювання електронним і лазерним променем

Зварювання електронним променем відносять до зварювання плавленням. Проте, на відміну від дугових методів зварювання, його застосовують у глибокому вакуумі ($10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па) за умов дефіциту іонів, що переносять електричний розряд. Із цієї причини дуговий електричний розряд у вакуумі нестійкий.

При зварюванні у вакуумі заготовку розміщують у камері. Джерелом тепла є потік прискорених електронів. Швидкість електронів, що дорівнює приблизно половині швидкості світла, забезпечується високою прискорювальною напругою (10...150 кВ) між катодом і анодом (заготовкою). Електрони, які випромінює катод, прискорюються і концентруються в промінь (діаметр до 10 мкм), що бомбардує метал. При цьому в процесі гальмування, внаслідок переходу кінетичної енергії в теплову, виділяється теплота. Температура у місці зварювання досягає 5000...6000 °С. Це надає променю високої здатності до проплавлення, яке дає змогу за один прохід зварювати заготовки завтовшки до 50 мм та отримувати шви мінімальної ширини, що виключає викривлення заготовок при зварюванні. Співвідношення ширини та глибини шва досягає 1 : 20 (дугове зварювання забезпечує це співвідношення в межах 1/3...1).

Зварювання електронним променем забезпечує найвищу якість з'єднань будь-яких металів, зокрема тугоплавких і таких, що окислюються при підвищених температурах. Висока концентрація нагріву в фокусі променя (до 5×10^8 Вт/см²) дає змогу також пробивати отвори в сапфірах, рубінах, алмазах тощо, зварювати неоднорідні матеріали (метали і неметали) завтовшки 0,01...100 мм з різними температурами плавлення та іншими теплофізичними характеристиками.

При лазерному зварюванні джерелом теплової енергії є потужний сконцентрований світловий промінь, який одержують у спеціальних установках — лазерах. Найпоширенішими є лазери зі штучним рубіном (рис. 12.6). Такий лазер складається з циліндричного рубінового стрижня (1), імпульсної ксенонової лампи (2), лінзи (4) та охолоджувальної системи (3).

Торці стрижня відполіровані й покриті сріблом. Один із них, що сприяє виходу світлового променя назовні, частково прозорий. Під час роботи ксенонової лампи атоми хрому рубінового кристала пере-

ходять із нормального стану в збуджений, з іншим енергетичним рівнем. Проте через декілька мілісекунд вони знову повертаються до нормального стану, хаотично випромінюючи фотони червоного світла. Потік їх уздовж осі стрижня викликає випромінювання нових фотонів, які поперемінно віддзеркалюються від торцевих граней,

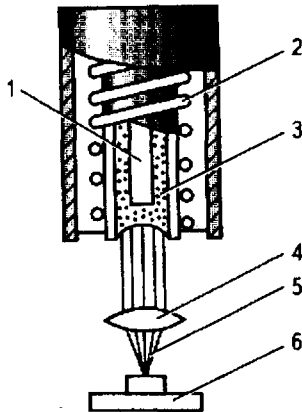


Рис. 12.6

Схема лазерного зварювання:

- 1 — рубіновий стрижень; 2 — ксенонова лампа;
- 3 — система охолодження; 4 — лінза;
- 5 — сфокусований потік монохроматичного світла;
- 6 — виріб

збільшуючи інтенсивність загального випромінювання. При накопиченні певного рівня фотонів вони у вигляді потоку червоного кольору прориваються крізь напівпрозорий торець стрижня назовні. Проходячи крізь лінзу (4), промінь (5) фокусується на виріб (6). Тривалість імпульсу лазерного променя дорівнює тисячним і мільйонним часткам секунди. Питома потужність лазера може перевищувати 10^{10} Вт/см². Під час контакту променя зі зварюваним виробом виділяється тепла енергія, температура в місці стику досягає 6000 °С.

Лазерне зварювання дає змогу обробляти вироби в будь-якому середовищі (вакуумі, газі, повітрі), що передає промінь світла. Деталі можна розмішувати в ампулах. Завдяки волоконній оптиці промінь можна спрямовувати у важкодоступні місця, приміщення з високою радіоактивністю тощо. Найдоцільніше лазерне зварювання застосовувати для мікроз'єднань, виготовлення мікроотворів, різних композицій металів завтовшки до 0,5 мм, у мікроелектроніці.

§ 12.6

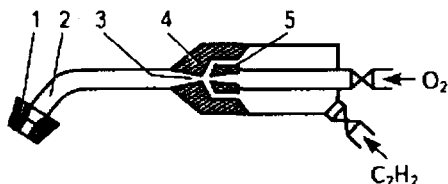
Газове зварювання та різання металу

Основний і присадний метали під час газового зварювання розплавляються теплом газового полум'я, яке одержують від згоряння горючого газу в суміші з киснем. Газовим різанням називають процес спалювання металів у струмені кисню. Найчастіше паливом є ацетилен (C_2H_2), іноді — водень, нафтові гази, пари бензину або гасу. При спалюванні ацетилену досягають найвищої температури $3200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одержують ацетилен у спеціальних генераторах при взаємодії карбіду кальцію (CaC_2) з водою. З 1 кг карбіду утворюється приблизно 300 л ацетилену.

Рис. 12.7

Схема інжекторно-зварювального ацетиленового пальника:

- 1 — мундштук; 2 — наконечник; 3 — камера змішування; 4 — камера розрядження; 5 — інжектор



Основний інструмент газового зварювання — *пальник* — призначений для змішування у певних пропорціях газу та кисню. За принципом дії пальники поділяють на: • інжекторні низького тиску (за тиском ацетилену); • безінжекторні рівного тиску (за тиском ацетилену та кисню). Розрізняють також одно- і багатополумєніві пальники. Найпоширенішим є інжекторно-зварювальний пальник (рис. 12.7), під час роботи якого кисень з балона надходить до інжектора (5) і зі значною швидкістю витікає з конусного отвору інжектора, що сприяє створенню розрядження в камері (4). За рахунок цього ацетилен, що подається при низькому залишковому тиску $0,001\ldots 0,005\text{ МПа}$ ($0,01\ldots 0,05\text{ атм}$), засмоктується до камери змішування (3), утворюючи суміш, яка надходить до наконечника (2) і при виході з мундштука (1) підпалюється.

Поширеним способом з'єднання елементів при газовому зварюванні — є зварювання встик. Метод газового зварювання забезпечує плавне нагрівання і повільне охолодження виробів. Застосовують його для ремонтних робіт, при виготовленні виробів зі сталі й сплавів кольорових металів, для наплавки тощо.

При зварюванні сталі газове полум'я відповідає співвідношенню $O_2/C_2H_2 \approx 1$, при зварюванні латуні використовують окислювальне

полум'я ($O_2/C_2H_2 > 1$), при зварюванні чавунів і кольорових металів — науглещувальне полум'я ($O_2/C_2H_2 < 1$). Крім цього, для зварювання кольорових металів використовують флюси.

Газовий різак відмінний від зварювального пальника тим, що його наконечник утворює прямий кут зі стоволом різача. Він має також додаткову трубу для подачі кисню крізь центральний отвір мундштука (рис. 12.8).

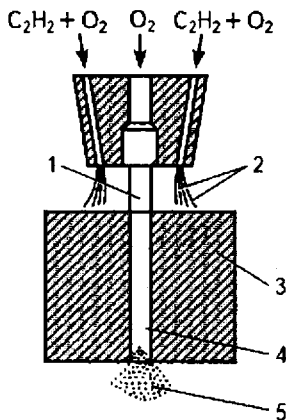


Рис. 12.8

Схема газокисневого різання металів:

- 1 — струмінь різального кисню; 2 — полум'я;
3 — метал виробу; 4 — зона різання;
5 — розплавлені оксиди

Різання починають з нагрівання металу (3) у вихідній точці різання до температури зполум'яніння металу в кисні. Метал нагрівають полум'ям (2), яке утворюється при згорянні ацетилену в кисні. Коли температура підвищується до потрібної, впускають струмінь різального кисню (1). Потрапляючи на метал, що нагрівся, кисень запалює його. Розплавлені оксиди (5), що утворюються, захоплюються струменем кисню і виносяться з зони різання (4).

Газовому різанню піддають лише метали, що відповідають певним вимогам. Розглянемо основні з них. Температура плавлення оксидів має бути меншою за температуру плавлення металу, а температура плавлення металу має перевищувати температуру горіння цього металу в кисні. Для газового різання найбільш придатні залізо і залізовуглецева сталь ($C < 0,8 \%$). Для обробки високолегованих сталей, чавунів, міді, латуні та бронзи використовують киснево-флюсове різання. Тоді до зони реакції додатково вводять порошки флюсів на залізній основі. Горіння цих флюсів дає додаткове тепло, крім цього,

частки флюсу сприяють механічному видаленню з поверхні розрізу тугоплавких оксидів. Розрізняють три типи кисневого різання:

- розподілювальне (розкроювання металу);
- поверхневе (для усунення поверхневих дефектів);
- різання для одержання отворів у виробах з металу і бетону.

§ 12.7

Електричне контактне зварювання

Електричне контактне зварювання — це процес утворення нероз'ємного з'єднання за рахунок зчеплення атомів металу, яке здійснюється за локального нагрівання деталей електричним струмом з обов'язковим наступним їх стисненням. Таке зварювання можна здійснювати без розплавлення металу (при нагріванні до пластичного стану) або з локальним розплавленням у зоні контакту. Серед багатьох різновидів електричного контактного зварювання виділяють такі основні типи:

- точкове;
- шовне;
- стикове.

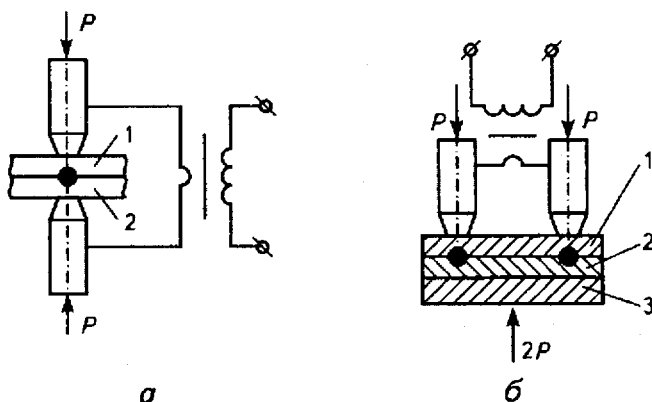


Рис. 12.9

Схеми дво- (а) та одностороннього (б) точкового зварювання

При двосторонньому *точковому* зварюванні (рис. 12.9, а) деталі (1, 2) розміщують внапуск одна на одну, затискають із зусиллям P між двома мідними електродами, які підводять струм до місця зварювання. При двосторонньому зварюванні й нагріванні бере участь увесь струм. При односторонньому — струм розподіляється між

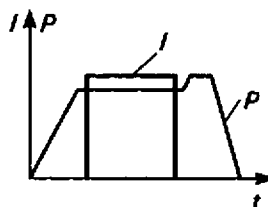


Рис. 12.10

Цикл роботи контактної точкової зварювальної машини:

I — струм, А; P — зусилля стискування, МПа;
 t — час зварювання, с

верхньою (1) і нижньою (2) заготовками (рис. 12.9, б) та підкладкою (3) з міді. При односторонньому зварюванні зварюються дві заготовки, а при двосторонньому — дві-чотири. Для проковування точки зварювання додатково збільшують тиск (рис. 12.10). Діаметр точки зварювання (d_T) визначають за формулою

$$d_T = 2\delta + 3 \text{ мм},$$

де δ — товщина зварюваного листа, мм.

Рекомендована відстань між зварювальними точками $L = 2,5 d_T$. Цей вид зварювання застосовують для з'єднання листових конструкцій з вуглецевих і легированих сталей, кольорових металів.

При *шовному* (роликовому) зварюванні між заготовками утворюється міцний і щільний шов. Складається він із низки послідовно розміщених точок зварювання, які частково накладаються одна на

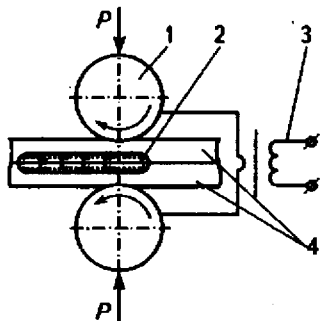


Рис. 12.11

Схема шовного двостороннього зварювання:

1 — дискові електроди; 2 — зварювальне ядро;
3 — джерело струму; 4 — виріб

одну. Такий вид зварювання також може бути одно- та двостороннім. Схема двостороннього зварювання зображена на рис. 12.11.

Основні технологічні цикли процесу шовного зварювання такі:
• з безперервним вмиканням струму (рис. 12.12, а); з переривчастим вмиканням (рис. 12.12, б). Перший застосовують для зварювання коротких швів металів, які не схильні до зростання зерна і змін

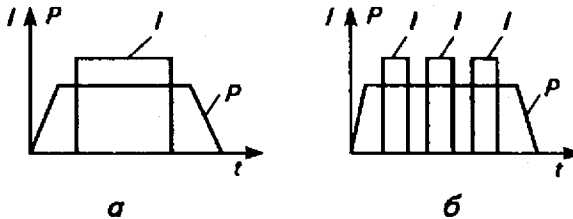


Рис. 12.12

Цикл роботи шовного зварювання з безперервним (а) і переривчастим (б) включенням струму:

I — струм, А; P — зусилля стискування, МПа; t — час зварювання, с

структури під час нагрівання, а другий — для зварювання довгих швів металів, для яких перегрів небезпечний (неіржавіючі сталі, сплави алюмінію).

Шовне зварювання застосовують при виготовленні тонкостінних емкостей для зберігання і транспортування рідини або газів, а також у виробництві тонкостінних труб.

Стикове зварювання здійснюється при пластичному деформуванні заготовок, нагрітих у зоні зварювання (рис. 12.13).

Перед зварюванням заготовки очищують від оксидної плівки, механічно обробивши їх, щільно підганяють торці один до одного. На початку зварювання заготовки стискають, а потім вмикають електричний струм, під дією якого місця з'єднання нагріваються до пластичного стану. У процесі зварювання заготовки продовжують притискувати, стик потовщується і відбувається зварювання по всій площині контакту.

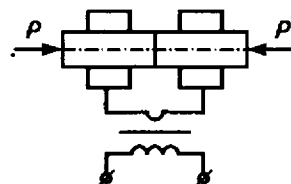


Рис. 12.13

Схема контактного зварювання опором

Стикове зварювання з оплавленням — це вид контактного зварювання, при якому заготовки зближують, коли струм вже ввімкнуто. Внаслідок цього на торцях виникають дугові розряди, які оплавляють метал. Після оплавлення заготовки швидко притискують торцями (процес осаджування), оплавлений метал витискується з зони дотику й утворюється зварювальне з'єднання по всій площині контакту. Максимальна площа перерізу, що зварюється, — до $6 \times 10^4 \text{ мм}^2$. Цим способом легко зварюють різномірні метали різних перерізів. Широко застосовують стикове зварювання різального інструменту, залізничних рейок, труб магістральних газо- і нафтопроводів.

§ 12.8

Зварювання тертям, газопресуванням, дифузійне зварювання

Способи зварювання тертям і газопресуванням належать до зварювання тиском і відрізняються вони лише джерелом теплоти. *Зварювання тертям* (рис. 12.14) здійснюють у твердому стані, використовуючи теплоту як наслідок тертя поверхонь зварюваних елементів. Спочатку при їхньому обертанні на поверхнях металів руйнуються окисні плівки, й механічна енергія перетворюється на теплову.

При цьому локальне підвищення температури досягає $950 \dots 1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Досягши необхідної температури, відносний рух зварюваних елементів майже миттєво припиняють, і до нагрітих нерухомих деталей підводять стискальні зусилля. При зварюванні тертям, порівняно з електричним, витрати енергії зменшуються у $5 \dots 10$ разів. Перевагами цього виду зварювання є екологічність, відсутність газовиділень і випромінювання. Зварювання тертям застосовують для з'єднання одно- та різномірних металів (сталь з алюмінієм), виготовлення різального інструменту, валів, штоків тощо.

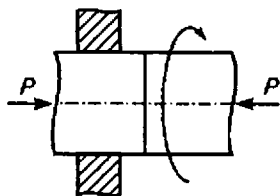


Рис. 12.14

Схема зварювання тертям

При зварюванні газопресуванням торці або кромки заготовок нагрівають полум'ям пальників до пластичного стану або до оплавлення, після чого заготовки притискують одну до одної. Перевагою газопресового зварювання є плавні режими нагрівання й охолодження, воно придатне й для проведення ремонтних робіт великих об'єктів. Проте через низьку продуктивність і складність оснащення застосування цього виду зварювання обмежене.

Сутність дифузійного зварювання зводиться до створення умов для максимальної швидкості дифузії на межі контакту зварювальних деталей, утворення нових зерен, які належать водночас кожному з металів, що контактують. Для цього температура має бути такою, щоб зберегти твердий стан металів і максимально підвищити швидкість дифузійних процесів; тиск має бути нижчим за поріг текучості; вакуум застосовують для захисту від окислення. Зварювання здійснюють у вакуумі ($10^{-1} \dots 10^{-3}$ Па) або в атмосфері інертних газів, нагрітих до $400 \dots 1300$ °C під тиском до $10 \dots 20$ МПа. Зварювані метали нагрівають індукційними струмами високої частоти (до $600 \dots 800$ °C), електронним або лазерним променем. Температури у цьому інтервалі сприяють ефективному руйнуванню оксидних плівок, щільний контакт поверхонь металів полегшує перебіг дифузійних процесів.

Дифузійне зварювання уможливорює з'єднання однорідних і різнорідних металів та їхніх сплавів, а також металокерамічних виробів з металами. До переваг цього способу зварювання слід віднести міцне з'єднання без помітних змін фізико-механічних властивостей у зоні зварювання. Практично використовують два різновиди технології:

- без проміжного шару (для однорідних металів);
- з проміжним шаром (містить плавкі та неплавкі прошарки).

Проте цей спосіб зварювання потребує застосування складного обладнання, обмежує розміри заготовок розмірами вакуумної камери й є досить тривалим ($10 \dots 30$ хв).

Дифузійне зварювання застосовують в електронній, космічній, авіаційній техніці, при створенні багат шарових композиційних матеріалів.

§ 12.9

Ультразвукове зварювання

Ультразвукове зварювання також відносять до зварювання тиском. Для нього характерне застосування ультразвукових механічних коливань і незначних зусиль стискування. Використовуючи ефект магнітострикції, тобто здатність деяких металів і їхніх сплавів до перетворення електромагнітних коливань ультразвукової частоти (15... 100 кГц) на механічні, одержують коливання тієї самої частоти. Таку здатність мають сплави нікелю з залізом (пермалой), кобальту з залізом (пермендюр) тощо. З них виготовляють магнітострикційні перетворювачі.

Заготовки (5) для зварювання (рис. 12.15) розміщують на опорному електроді (6), який притискує заготовки до наконечника (4) хвилеводу (3). Його з'єднують з котушкою (2) магнітострикційного вібратора (1).

Перемінний струм високої частоти, проходячи крізь котушку, збуджує в ній перемінне магнітне поле, яке передає механічні коливання на її стрижень. Зміна розмірів на торці магнітостриктора незначна — 1...3 мкм. Для збільшення амплітуди коливань застосовують хвилеводи складної форми, забезпечуючи амплітуду коливань до десятків мікрометрів. Ці коливання викликають сили тертя в місцях зварювання, руйнують оксидні плівки, пластично деформують поверхневі шари, нагрівають поверхні металу до 200...1200 °С. Отже, створюються умови зближення зварюваних матеріалів до відстані взаємодії міжатомних сил, що сприяє утворенню міцних зварюваних з'єднань. На спеціальному обладнанні однорідні та різнорідні метали і сплави зварюють “внапуск” завтовшки 0,001...1 мм з утворенням точкових і шовних з'єднань.

За такою технологією добре зварюються алюміній і його сплави, титан, цирконій, нікель; гірше — низьковуглецеві, жароміцні та

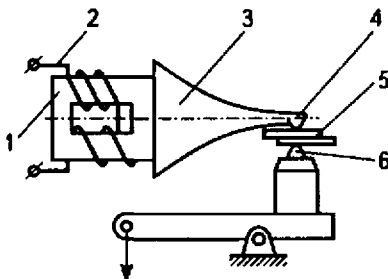


Рис. 12.15

Схема ультразвукового зварювання:

- 1 — магнітострикційний вібратор; 2 — котушка;
- 3 — хвилевід; 4 — наконечник; 5 — заготовки;
- 6 — опорний електрод

інструментальні сталі, сплави магнію. Ультразвукове зварювання застосовують також для з'єднання неметалевих матеріалів — хлорвінілу, поліетилену, капрону, органічного скла, біологічних тканин тощо.

§12.10

Зварювання вибухом

Під зварюванням вибухом розуміють з'єднання металів у твердому стані з утворенням нових атомних зв'язків у процесі високошвидкісного зіткнення тіл, яке здійснюють з використанням енергії вибухових речовин або інших джерел енергії з великою питомою потужністю (рис. 12.16, а). На верхній частині заготовки розміщують вибухову речовину (2). При спрацюванні детонатора (1) відбувається спрямований вибух, і тиск 10^4 МПа (до 10^5 атм), що утворюється, сприяє переміщенню верхньої заготовки (3) до нижньої (4). Під час удару в точці А (рис. 12.16, б) видаляються тонкі поверхневі шари металу, оксидні плівки і забруднення. Заготовки (3 і 4) зближуються на відстань, що забезпечує взаємодію міжатомних сил. У такий спосіб за тисячні частки секунди поверхні в кілька квадратних метрів з'єднують з досить високою міцністю. Основними параметрами зварювання вибухом є швидкість детонації D , нормальна швидкість V_n , кут γ . Вихідний проміжок між зварюваними заготовками дорівнює 2...3 мм.

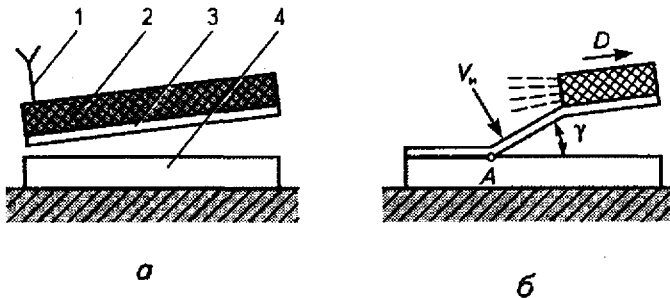


Рис. 12.16

Схема зварювання вибухом:

а — вихідне положення; б — процес зварювання

Цей вид зварювання має певні недоліки і переваги. До переваг слід віднести універсальність, самоочищення контактних поверхонь, зміцнення металу біля меж з'єднання, відсутність термічного впливу і прошарків дифузійного походження, можливість багат шарового зварювання, негроміздке, просте обладнання. Основними вадами зварювання вибухом вважають необхідність встановлення заготовок під кутом, складність стикового зварювання, небезпечність застосування вибухових речовин.

§ 12.11

Зварювання пластмас

Зварювання пластмас здійснюють шляхом використання теплоносія (нагрітого газу або інструмента) або нагріву тертям, струмами високої частоти (СВЧ), ультразвуком.

Контактні методи застосовують переважно для з'єднання деталей з термопластів, а зварювання реактопластів, зазвичай, проводять СВЧ або ультразвуком, які використовують і для зварювання термопластів.

Зварювання однорідних термопластів відбувається під тиском за рахунок взаємного проникнення (дифузії) частинок поверхневих шарів, розігрітих до в'язкотекучого стану. Температура зварювання та затрати тепла на розігрів матеріалу залежать від його складу, теплоємності, товщини та ширини зварювального шва. Тому нагрівачі бажано виготовляти з терморегуляторами. При роботі з термопластами, широко застосовують зварювання гарячим газом (газовим теплоносієм) та нагрітим інструментом (контактний нагрів).

Зварювання гарячим газом виконується за допомогою спеціальних зварювальних пальників. Сутність цього способу полягає в тому, що зварювані поверхні термопласта і присадний прутки (якщо він використовується) нагріваються гарячим газом і розм'якшуються до такого ступеня, що при незначному тиску відбувається їх злипання. Газовим теплоносієм слугує повітря або інертний газ (аргон, азот). Застосовується інертний газ для зварювання поліетилену, поліамідів та інших термопластів. Повітря в такий пальник подається від компресора під тиском 0,15...0,25 МПа (тобто 1,5...2,5 атм), а інертний газ — безпосередньо з балона.

В електричному пальнику повітря, що подається (або азот), нагрівається електричними спіралями. Розжарення спіралі регулюється автотрансформаторами. В газовому пальнику повітря (або азот) нагрівається за рахунок згоряння горючого газу в порожнині пальника, а подача газу регулюється краном.

Вадою газових пальників є неточність регулювання температури газу, що обігріває поверхні.

Перед зварюванням на кромках зварюваних деталей, залежно від їхньої товщини, знімають фаску під кутом 30...60°.

Зварювання контактним нагрівом виконують як вручну, так і на спеціальних механічних установках та пристроях.

Залежно від форми матеріалу як нагрівачі можуть використовуватися: паяльники, стрижні, пластини, клини та наконечники різних форм. При зварюванні контактним нагрівом після видалення нагрітого інструмента поверхні деталей також стискають, чим і забезпечують нероз'ємне з'єднання.

Зварювання пластмас тертям, як і металів, засноване на використанні тепла, що виділяється при терті поверхонь зварюваних деталей. Труби та прутки зварюють на спеціальних установках, але можна застосовувати і токарні верстати.

Зварювання з нагрівом СВЧ засноване на використанні тепла, яке виділяється за рахунок діелектричних втрат в зоні дії високочастотного електричного поля. В промисловості широко застосовують спеціальні машини, що забезпечують роликове, точкове, пресове зварювання плівок, листів, труб. Зварювання з нагрівом СВЧ забезпечує міцність та герметичність швів, високу продуктивність і економічність процесу.

Ультразвукове зварювання пластмас практично таке саме як і ультразвукове зварювання металів, оскільки в обох випадках ультразвукові коливання магнітостриктора перетворюються на теплову енергію, яка сприяє формуванню нероз'ємного з'єднання.

При зварюванні ультразвуком заготовки з пластика розігріваються тільки в зоні контактуючих поверхонь, що гарантує від перегріву. Використання спеціальних хвилеводів дає змогу застосовувати ультразвукове зварювання у важкодоступних місцях.

Нероз'ємні з'єднання в деталях із пластмас здійснюють і шляхом склеювання. Для цього використовують синтетичні клеї, які підрозділяють на три групи:

- термореактивні (на основі фенолформальдегідних, поліуретанових, поліефірних, епоксидних та інших смол);
- термопластичні (дихлоретан, бензол та інші);

- на основі каучуків.

Склеювання виконують без нагріву (клеї Б-3, ПУ-2, ВК-5 та інші) та з нагрівом до 150...250 °С (клеї БФ-2, БФ-4, ВК-3 тощо).

Технологічний процес склеювання деталей складається: • з підготовки поверхонь; • зачистки (знежирювання); • нанесення клею; • просушування клейових плівок перед з'єднанням (іноді); • з'єднання поверхонь, що необхідно склеїти; • закріплення під визначеним тиском; • термообробки (тверднення) клейового з'єднання, або витримки при нормальній температурі.

Контрольні запитання

1. У чому полягає сутність процесу зварювання?
2. У чому полягає сутність і відмінності ручного та автоматичного дугового зварювання?
3. У чому суть процесу електрошлакового зварювання?
4. Що являє собою дугове зварювання в захисній атмосфері?
5. У чому суть плазмодугового зварювання?
6. У чому суть зварювання електронним променем?
7. У чому суть зварювання лазерним променем?
8. У чому суть і відмінності газового зварювання та різання металу?
9. У чому суть та відмінності точкового і шовного електричного контактного зварювання?
10. У чому суть та відмінності контактного зварювання опором та оплавленням?
11. У чому суть зварювання тертям та газопресуванням?
12. У чому суть дифузійного зварювання?
13. Що являє собою ультразвукове зварювання?
14. У чому суть процесу зварювання вибухом?
15. Якими способами здійснюють зварювання пластмас?

Список рекомендованої літератури

1. Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Нікоз О. І. та ін. Технологія конструкційних матеріалів. — Київ: Вища школа, 2002.
2. Дриц М. Е., Москалев М. Л. Конструкционные материалы и материаловедение. — Київ: Вища школа, 1990.
3. Терехов В. К. Металловедение и конструкционные материалы. — М.: Высшая школа, 1981.
4. Кузьмин Б. А., Абраменко Ю. Е., Ефремов В. К. и др. Технология металлов и конструкционные материалы. — М.: Машиностроение, 1991.
5. Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Степаненко В. О., Москаленко Ю. Н. Матеріалознавство та обробка металів. — Київ: Вікторія, 2000.
6. Дальский А. М., Дубинин Н. П., Макаров Э. Л., Попов Е. Л. Технология конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1985.
7. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990.
8. Алаи С. И., Григорьев П. М., Ростовцев А. Н. Технология конструкционных материалов. — М.: Просвещение, 1980.
9. Кузьмин Б. А., Самохоцкий А. И. Металлургия, материаловедение и конструкционные материалы. — М.: Высшая школа, 1984.

ЗМІСТ

<i>Вступ</i>	3
Розділ 1	
Механічні властивості матеріалів та їхні характеристики	
ГЛАВА 1. Основні механічні властивості матеріалів та їхні характеристики	8
§ 1.1. Навантаження, деформація, напруження	8
§ 1.2. Жорсткість, міцність, пружність матеріалів	13
§ 1.3. Пластичність та в'язкість	18
§ 1.4. Основні відмінності між пластичними й крихкими матеріалами	23
§ 1.5. Поняття про умову міцності	26
§ 1.6. Втомна міцність	28
§ 1.7. Дисипація енергії	30
§ 1.8. Твердість і методи її визначення	32
§ 1.9. Напружений стан та види руйнування	36
ГЛАВА 2. Вплив різних факторів на механічні властивості матеріалів	43
§ 2.1. Вплив температури	43
§ 2.2. Вплив пластичного деформування. Наклеп	49
§ 2.3. Вплив напруженого стану та масштабного фактора	53
§ 2.4. Вплив зовнішнього середовища та хімічного складу	54

Розділ 2

Будова та властивості металів і сплавів

ГЛАВА 3. Будова металів і сплавів	58
§ 3.1. Характеристика, будова і класифікація металів	58
§ 3.2. Атомно-кристалічна структура металів	60
§ 3.3. Дефекти кристалічної будови металів	64
§ 3.4. Процеси кристалізації металів	68
§ 3.5. Дендритна кристалізація і будова металевого зливка . . .	71
§ 3.6. Основи теорії сплавів	74
§ 3.7. Діаграми стану сплавів	77
§ 3.8. Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів . . .	81
§ 3.9. Зв'язок між типом діаграми стану та властивостями сплавів	85
ГЛАВА 4. Залізовуглецеві сплави	88
§ 4.1. Діаграма стану системи залізо — вуглець	88
§ 4.2. Фазові та структурні перетворення залізовуглецевих сплавів у зв'язку з діаграмою стану	94
§ 4.3. Вуглецеві сталі	100
§ 4.4. Промислові чавуни	104
§ 4.5. Леговані сталі	111
ГЛАВА 5. Основи термічної обробки	121
§ 5.1. Загальні уявлення	121
§ 5.2. Перетворення та основні структури при нагріванні та охолодженні сталі	122
§ 5.3. Вплив нагріву на структуру і властивості деформованого металу	134
§ 5.4. Класифікація видів термічної обробки	139
§ 5.5. Технологічні процеси термічної обробки сталі	141
§ 5.6. Хіміко-термічна обробка сталі	149
§ 5.7. Термомеханічна обробка	154
§ 5.8. Термічна обробка чавуну	156

ГЛАВА 6. Кольорові метали і сплави	162
§ 6.1. Алюміній та його сплави	162
§ 6.2. Мідь та сплави на її основі	168
§ 6.3. Титан, магній та їх сплави	174

Розділ 3

Порошкові та неметалеві матеріали

ГЛАВА 7. Порошкова металургія	178
§ 7.1. Основні технології виробництва порошків	178
§ 7.2. Властивості порошків	185
§ 7.3. Виробництво матеріалів та виробів з порошків	188
§ 7.4. Продукція порошкової металургії	190
ГЛАВА 8. Неметалеві конструкційні матеріали	194
§ 8.1. Полімери	194
§ 8.2. Гумові матеріали	203
§ 8.3. Клеї	207
§ 8.4. Лакофарбові матеріали	211
§ 8.5. Деревина	212
§ 8.6. Неорганічне скло	215

Розділ 4

Технологія виготовлення виробів

ГЛАВА 9. Технологія ливарного виробництва	220
§ 9.1. Сутність ливарного виробництва і ливарні властивості сплавів	220
§ 9.2. Вимоги щодо виготовлення моделей і виливків	224
§ 9.3. Технологія виготовлення виливків у разових ливарних формах	225
§ 9.4. Лиття в оболонкові форми	234
§ 9.5. Лиття з використанням плавких і газифікованих моделей	236
§ 9.6. Лиття в металеві форми (кокілі)	237

§ 9.7. Лиття під тиском та інші способи лиття	238
ГЛАВА 10. Технологія обробки тиском	241
§ 10.1. Сутність процесу і види обробки	241
§ 10.2. Фактори, що впливають на процес обробки, і обладнання для нагрівання металу	242
§ 10.3. Прокатування листового та профільного металу	245
§ 10.4. Прокатування труб	248
§ 10.5. Волочіння	250
§ 10.6. Пресування	251
§ 10.7. Кування	254
§ 10.8. Штампування	257
§ 10.9. Обробка пластмас	261
ГЛАВА 11. Технологія обробки різанням	265
§ 11.1. Сутність процесу, основні поняття і визначення . . .	265
§ 11.2. Параметри і фізичні явища, що супроводжують процес різання	270
§ 11.3. Стійкість і матеріали різального інструмента	274
§ 11.4. Металорізальні верстати	277
§ 11.5. Точіння	278
§ 11.6. Свердління, розточування	281
§ 11.7. Фрезерування	285
§ 11.8. Стругання, довбання, протягання	288
§ 11.9. Зубонарізування	290
§ 11.10. Шліфування	292
§ 11.11. Поверхнєве пластичне деформування	297
ГЛАВА 12. Технологія зварювання	299
§ 12.1. Сутність процесу і класифікація способів зварювання	299
§ 12.2. Ручне і автоматичне дугове зварювання	301
§ 12.3. Електрошлакове зварювання	304
§ 12.4. Дугове зварювання в захисній атмосфері, плазмодугове зварювання	305
§ 12.5. Зварювання електронним і лазерним променем	307

§ 12.6. Газове зварювання та різання металу	309
§ 12.7. Електричне контактне зварювання	311
§ 12.8. Зварювання тертям, газопресуванням, дифузійне зварювання	314
§ 12.9. Ультразвукове зварювання	316
§ 12.10. Зварювання вибухом	317
§ 12.11. Зварювання пластмас	318
<i>Список рекомендованої літератури</i>	<i>321</i>

Навчальне видання

**Хільчевський Володимир Васильович
Кондратюк Станіслав Євгенович
Степаненко Валерій Олександрович
Лопатько Костянтин Георгійович**

**Матеріалознавство і технологія
конструкційних матеріалів**

*Художник обкладинки О. Г. Григір
Художньо-технічний редактор Т. О. Щур
Коректори А. В. Бородавко, Л. Ф. Іванова
Комп'ютерна верстка О. В. Клембіцької*

Підл. до друку 30.10.2002. Формат 60 x 84/16. Папір офсет. № 1. Ум. друк. арк. 19,07.
Ум. фарбовідб. 19,53. Обл.- вид. арк. 21,00. Вид. № 4094. Зам. № 2-274.

Видавництво "Либідь" при Київському університеті,
01004 Київ 4, вул. Пушкінська, 32
Свідцтво про державну реєстрацію № 404 від 06.04.2001 р.

Віддруковано на ВАТ "Білоцерківська книжкова фабрика",
09117, м. Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4.