

Професійно-
технічна освіта
України



С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук,
В. О. Степаненко, Ю. Н. Москаленко

МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ

у запитаннях
і відповідях



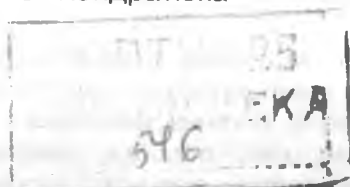
178

**С. Є. КОНДРАТЮК, М. В. КІНДРАЧУК,
В. О. СТЕПАНЕНКО, Ю. Н. МОСКАЛЕНКО**

МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ

(У ЗАПИТАННЯХ І ВІДПОВІДЯХ)

За редакцією С. Є. Кондратюка



Допущено Міністерством освіти і науки України
як пробний підручник для учнів професійно-технічних
навчальних закладів

Київ
ВІКТОРІЯ
2000

УДК 669.017(075.32)

К 64

ББК 34.2я722

*Рішення колегії Міністерства освіти і науки України від
25 листопада 1998 р. Протокол № 16/3-18*

Рецензенти: А. П. Сьомик, д-р техн. наук, проф.
(Нац. техн. ун-т України «КПІ»);
С. М. Надуваний, директор професійно-
технічного училища № 4 м. Києва

К 64 Металознавство та обробка металів (у запитаннях і
відповідях): Підручник для учнів проф.-техн. навч.
закладів / С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук, В. О. Степа-
ненко, Ю. Н. Москаленко. - К. : Вікторія, 2000. - 372 с.
ISBN 966-95152-5-4

У підручнику викладено основні відомості про будову,
фазові перетворення і властивості машинобудівних матеріалів.
Розглянуто питання металургії, теорії й практики термічної та
хіміко-термічної обробки, ливарного виробництва, зварювання,
обробки металів різанням і тиском. Зміст викладеного матеріалу
відповідає навчальним програмам професійно-технічних училищ
та середньої технічної освіти.

Підручник побудований у формі запитань та відповідей і
призначений для учнів та студентів загальнотехнічних
спеціальностей профтехучилищ, технікумів, вузів, широкого за-
галу науково-технічних працівників.

ISBN 966-95152-5-43

ББК 34.2я722

© С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук,
В. О. Степаненко,
Ю. Н. Москаленко, 2000

ЗМІСТ

Передмова	5
✓ Розділ 1. Будова, кристалізація і властивості металів	7
✓ Розділ 2. Діаграми стану металевих систем	47
✓ Розділ 3. Залізовуглецеві сплави	71
✓ Розділ 4. Термічна обробка	113
✓ Розділ 5. Металеві матеріали машинобудування	165
Розділ 6. Металургія і ливарне виробництво	245
Розділ 7. Обробка металів тиском.	291
Розділ 8. Обробка металів різанням	315
Розділ 9. Зварювання	347
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	371



Зона рівноосних дендритів у виливку (3,5 т) середньовуглецевої сталі

ПЕРЕДМОВА

Зі становленням державності України, перебудовою систем професійно-технічного і вузівського навчання гостро постала проблема створення навчально-методичної літератури з основних технічних дисциплін, яка б відповідала сучасному рівню техніки і вимогам української науково-технічної термінології. Це стосується, зокрема, питань металознавства і технології обробки металів. Виходячи з цього, автори видання намагалися у стислій і доступній формі викласти основи знань про будову і властивості металевих матеріалів і способи їх обробки у межах відповідних навчальних програм професійно-технічних закладів, середньої ланки технічного навчання, а також перших курсів загальнотехнічних спеціальностей вузів.

У підручнику розглянуто базові питання будови і кристалізації металів, теорії і практики термічної та хіміко-термічної обробки, властивості основних машинобудівних металевих матеріалів, металургії, ливарного виробництва, технології зварювання, обробки металів тиском та різанням. Посібник побудовано у формі запитань і відповідей і може бути використаний для системного вивчення матеріалу за програмою, а також як довідник з широкого кола технічних питань, що сприятиме кращому засвоєнню матеріалу. Видання також буде корисним для викладачів відповідного профілю при підготовці лекцій і лабораторних завдань, тест-контролю, дистанційного навчання тощо, а також для активного засвоєння

і пропагування сучасної української технічної термінології.

Передмова і розділи «Термічна обробка», «Металургія і ливарне виробництво» написані доктором техн. наук, професором С. Є. Кондратюком; розділи «Будова, кристалізація і властивості металів», «Залізовуглецеві сплави» - С. Є. Кондратюком і канд. техн. наук Ю. Н. Москаленком; розділ «Діаграми стану металевих систем» - Ю. Н. Москаленком; розділ «Металеві матеріали машинобудування» - доктором технічних наук, професором М. В. Кіндрачуком; розділи «Обробка металів тиском», «Обробка металів різанням» і «Зварювання» - доктором технічних наук, професором В. О. Степаненком.

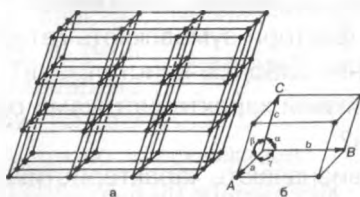
Автори будуть щиро вдячні всім, хто знайде можливість висловити свої зауваження щодо викладеного матеріалу і побажання щодо покращення видання.

РОЗДІЛ 1

Будова, кристалізація і властивості металів

1

метал
кристалічна ґратка
поліморфізм
магнітне перетворення
анізотропія
ізотропія
пластична деформація
надпластичність
рекристалізація
кристалізація
критичний зародок
механічні властивості



Питання, висвітлені у розділі 1

1. Що таке метали?
2. Як класифікують метали?
3. Що таке кристалічне і аморфне тіло?
4. Які параметри характеризують кристалічну ґратку?
5. Які типи кристалічних ґраток характерні для металів?
6. Що таке поліморфізм металів?
7. Що таке магнітне перетворення?
8. Анізотропія та ізотропія, що це?
9. Які типи міжатомного зв'язку існують в кристалах?
10. Чим відрізняються реальна та ідеальна будови металевих кристалів?
11. Що таке пружна і пластична деформація?
12. Які механізми діють за умов пластичного деформування металів?
13. Які процеси відбуваються при нагріванні пластично деформованого металу? Що таке повернення і рекристалізація?
14. Чим відрізняються процеси холодного і гарячого деформування (обробки тиском)?
15. Що таке надпластичність?
16. Які умови визначають існування того чи іншого агрегатного стану металу?
17. Як відбувається процес кристалізації?
18. Що таке критичний зародок кристалізації? Як він залежить від переохолодження?
19. Які фактори зумовлюють гетерогенне (несамочинне) утворення зародків кристалізації?
20. За якими характеристиками оцінюють властивості металів?
21. Як визначають характеристики основних механічних властивостей металевих матеріалів?

Метали - найпоширеніші у природі елементи. Нараховують їх близько 80. Розрізняють поняття металу як *хімічного елемента* Періодичної системи елементів

Д. І. Менделєєва і як *технічної речовини*. З позиції хімії метали - 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) на відміну від неметалів (5-8). Атоми металів досить легко втрачають зовнішні електрони, перетворюючись на позитивно заряджені йони. Вільні електрони легко переміщуються між утвореними позитивно зарядженими йонами, нагадуючи рух частинок газу («електронний газ»). Наявність такого електронного газу зумовлює особливий тип міжатомного зв'язку - металевий, притаманний тільки металам. У разі створення в металі різниці потенціалів, рух електронів набуває певного напрямку - виникає електричний струм. Наявністю і різною кількістю вільних (колективізованих) електронів пояснюють різний ступінь «металевості» окремих металів, а також їхньої електропровідності.

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

У техніці поняття «метал» означає речовину, яка має характерні властивості й металевий блиск, пластичність, високу тепло- і електропровідність. Терміном «метал» користуються також у визначенні металевих сплавів.

Залежно від будови і властивостей метали об'єднуються в різні групи. Найбільш загальна і поширена класифікація поділяє метали на дві групи - *чорні* і *кольорові*. За такою класифікацією до чорних металів відносять залізо і його сплави, а до кольорових - усі інші.

1. Що таке метали?

2. Як класифікують метали?

За класифікацією А. П. Гуляєва, метали також поділяються на чорні та кольорові. Чорні метали мають темно-сірий колір, високу температуру плавлення, досить високу твердість і щільність, характеризуються поліморфізмом (крім Ni), тобто мають різну будову кристалічної ґратки за різних температур.

Серед чорних металів розрізняють залізні - Fe, Co, Ni, Mn; тугоплавкі - з температурою плавлення вищою від температури плавлення заліза (понад 1539°C) - W, Mo, Re, Nb, Ti, V, Cr; уранові - актиніди, рідкоземельні (РЗМ) - La, Ce, Nd, Pr та інші. Типовими серед чорних металів є залізо й різні сплави на його основі (сталь, чавун). Частка використання чорних металів у техніці перевищує 90 %.

Решта металів - кольорові. Для кольорових металів характерними є забарвлення, пластичність, низькі температури плавлення, низька твердість, відсутність поліморфних перетворень. Найтипівішим представником групи кольорових металів є мідь. Серед кольорових металів розрізняють легкі метали - Be, Mg, Al; благородні - Ag, Au, Pt та метали платинової групи (Pd, Ir, Os, Ru, Rh); «напівблагородна» мідь; легкоплавкі - Zn, Cd, Hg, Sn, Pb, Bi, Tl, Sb, а також елементи з послабленими металевими властивостями - галій, германій. З кольорових металів виготовляють найрізноманітніші вироби. Кольорові метали додають також до легованих сталей і сплавів для поліпшення їхньої структури та властивостей.

3. Що таке кристалічне і аморфне тіло?

Залежно від будови (розташування атомів), тверді тіла поділяють на *кристалічні* та *аморфні*. За звичайних умов метали у твердому стані мають кристалічну будову. Кристалічні тіла характеризує чітко визначений (регулярний) порядок розташування атомів (точніше йонів) у просторі, який зумовлює утворення певного типу *кристалічної ґратки*, де сили взаємного тяжіння і відштовхування атомів урівноважені. Регулярність розташування атомів у кристалічному тілі зумовлює під час кристалізації утворення кристалів певної форми - симетричних, геометрично

правильних багатогранників (поліедрів). Просторове розташування атомів у кристалічному тілі залежить від природи металу, характеру міжатомних зв'язків, температури та тиску. Крім упорядкованого розташування атомів (кристалічна ґратка), кристалічні тіла мають певну фіксовану температуру плавлення і кристалізації.

Аморфні тіла характеризуються хаотичним розміщенням атомів. Тому вони, зберігаючи постійну форму, не мають певних (критичних) температур плавлення і кристалізації. Зміна їх властивостей, залежно від зовнішніх умов, відбувається поступово. Аморфний стан металів може досягатися за умов інтенсивного їх охолодження під час кристалізації.

Кристалічний стан речовин характеризує певне закономірне розташування атомів у просторі, яке можна уявити у вигляді просторової ґратки, у вузлах якої розташовані атоми. У вузлах кристалічної ґратки металів знаходяться не атоми, а позитивно заряджені йони. Між ними рухаються вільні електрони. Але зазвичай говорять, що у вузлах ґратки металів знаходяться атоми. Кожен атом має певну постійну кількість найближчих атомів-сусідів, розташованих на однаковій від нього відстані.

4. Які параметри характеризують кристалічну ґратку?

Кристалічна ґратка характеризується такими параметрами.

1. *Відрізки*, які у тривимірному просторі дорівнюють відстаням до найближчих атомів (йонів) по координатних осях, позначають літерами a , b , c .

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

3. *Комірка* - це найменша кількість атомів (комплекс), багаторазове повторення якого у просторі дозволяє побудувати просторову кристалічну ґратку (рис. 1.1) певної системи (табл. 1.1) з характерною формою комірки.

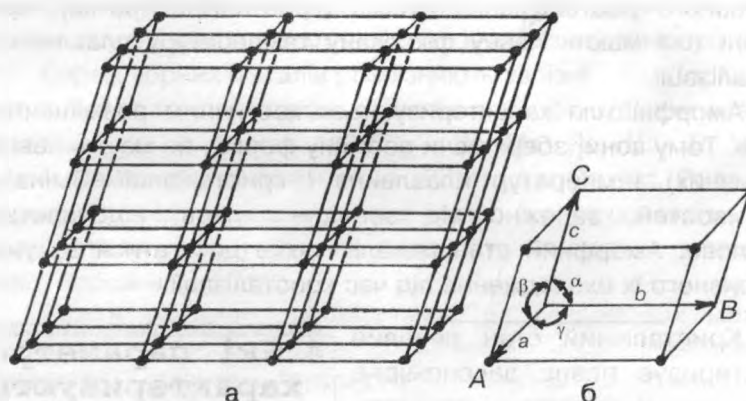


Рис. 1.1. Частина просторової ґратки: а - просторова ґратка; б - комірка

Таблиця 1.1

Характеристики кристалічних систем

Назва системи	Відрізки	Кути
Триклінна	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Моноклінна	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma \neq 90^\circ$
Ромбічна	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбоєдрична	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Гексагональна	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$
Тетрагональна	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубічна	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

4. *Період ґратки* дорівнює довжині ребра комірки у напрямі головних осей кристалічної ґратки. Періоди (параметри) ґратки вимірюють у нанометрах (нм) або ангстремах (Å). Наприклад, параметр ґратки хрому (об'ємно-центрований куб) дорівнює 2,878 Å, а алюмінію (гранецентрований куб) дорівнює 4,041 Å.

5. *Координаційне число* визначає кількість найближчих і рівновіддалених атомів (йонів) у певній кристалічній ґратці (рис. 1.2), характеризує щільність пакування ґратки. Координаційне число простої кубічної ґратки позначають К6 (літера вказує тип ґратки, цифра - кількість атомів); об'ємноцентрованої кубічної - К8; кубічної гранецентрованої - К12; гексагональної щільного пакування - Г12; гексагональної - Г6.

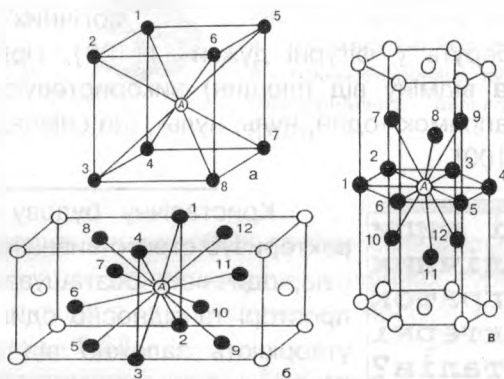


Рис. 1.2. Схема визначення координаційного числа у гранецентрованій кубічній ґратці (а), у об'ємноцентрованій кубічній ґратці (б), в гексагональній ґратці (в)

6. *Коефіцієнт компактності* відповідає відношенню об'єму, що займають атоми (йони), до всього об'єму комірки даного типу.

7. *Базис* - це кількість атомів (йонів), що належать до однієї комірки.

8. *Атомний радіус* дорівнює половині найменшої відстані між атомами (йонами) у певній кристалічній системі. Для характеристики просторової орієнтації кристалічної ґратки вико-

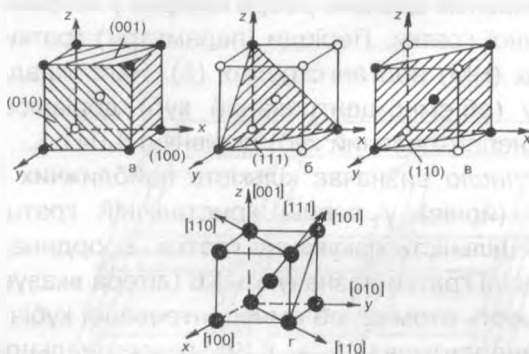


Рис. 1.3. Приклади позначення кристалографічних площин (а, б, в) і напрямків (г)

позначення беруть у фігурні дужки - $\{100\}$. При позначенні напрямків (на відміну від площин) використовують квадратні дужки. Так, напрямок «один, нуль, нуль», що співпадає з віссю X позначають $[100]$.

5. Які типи кристалічних ґраток характерні для металів?

Кристалічну будову металів характеризує строго визначений порядок і періодичність розташування атомів у просторі та відносно один одного, які утворюють залежно від цього певну кристалічну систему (просторову кристалічну ґратку). Особливості розташування атомів у кристалах визначають сукупність і відмінності властивостей металів.

Найпоширенішим серед промислових металів є утворення трьох основних типів кристалічних ґраток: кубічної об'ємно-центрованої (ОЦК), кубічної гранецентрованої (ГЦК) і гексагональної щільного пакування (ГЦП) кристалічної ґратки (рис. 1.4). Наприклад, Mo , W , V , Cr кристалізуються у системі ОЦК; Ni , Cu , Al , Pb - у системі ГЦК; Zn , Mg , Be , Cd - у системі

ристовують також індекси площин та індекси напрямів (рис. 1.3). Наприклад, площина, що відсікає один відрізок по осі x і не перетинає осі y та z позначають цифрами у круглих дужках (100) , і читають як «один, нуль, нуль». Коли розглядають сукупність аналогічних площин, їх

ГЦП. Залізо при температурах до 911°C і вище 1392°C має об'ємноцентровану кубічну ґратку (Fe_{α}), а в інтервалі температур від 911°C до 1392°C - гранецентровану кубічну ґратку (Fe_{γ}) (рис. 1.5).

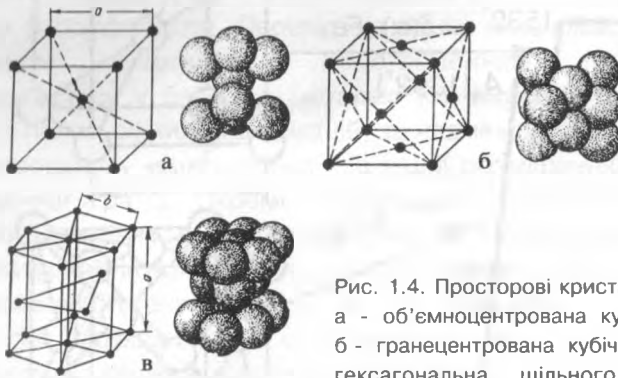


Рис. 1.4. Просторові кристалічні ґратки: а - об'ємноцентрована кубічна (ОЦК), б - гранецентрована кубічна (ГЦК), в - гексагональна щільного пакування (ГЦП)

Елементарна комірка ОЦК-ґратки складається з дев'яти атомів, вісім з яких розташовані у вершинах куба і один - у центрі. Координаційне число дорівнює восьми (К8); щільність пакування атомів - 0,68.

Елементарна комірка ГЦК-ґратки складається з чотирнадцяти атомів. Вісім з них знаходяться у вершинах куба і по одному в центрі кожної з граней. Координаційне число дорівнює дванадцяти (К12). Щільність пакування атомів - 0,74.

Гексагональна кристалічна ґратка щільного пакування (ГЦП) має елементарну комірку у формі шестигранної призми, що складається з 17 атомів, 12 з яких - у вершинах призми, 2 - у центрах основ і 3 - в середині призми. Координаційне число дорівнює дванадцяти (Г12), щільність пакування атомів - 0,74.

Можливе також утворення й інших типів кристалічних ґраток.

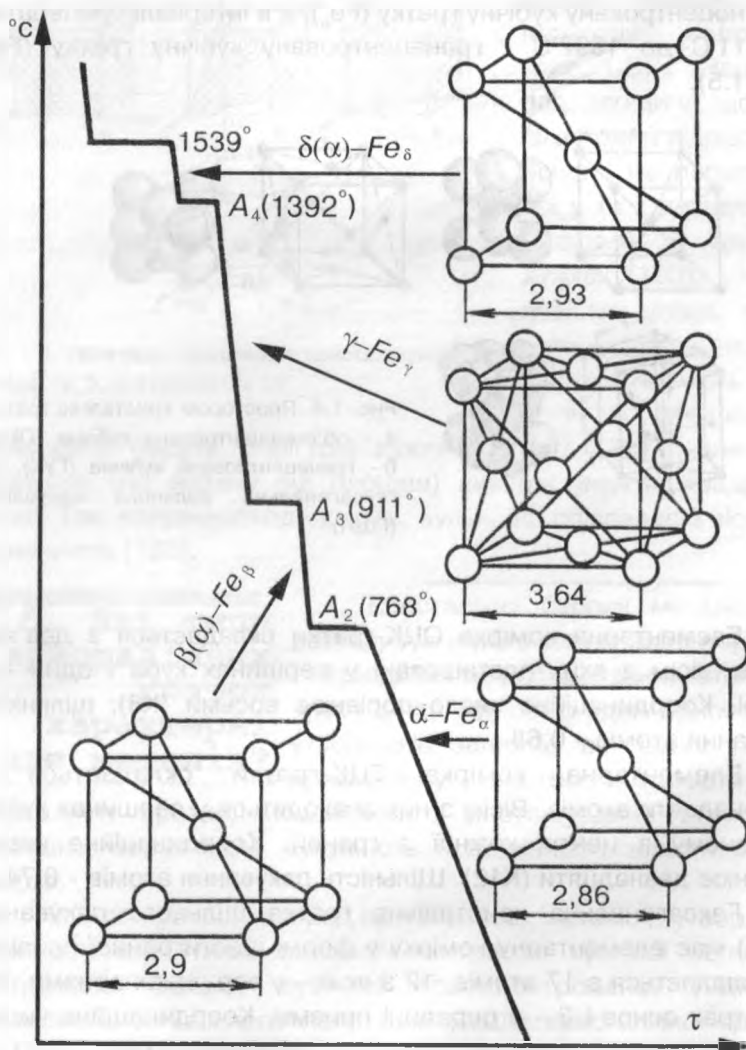


Рис. 1.5. Крива охолодження чистого заліза

6. Що таке поліморфізм металів?

Поліморфізм, або алотропія - це здатність деяких металів залежно від температури і тиску змінювати будову (тип) кристалічної ґратки, тобто існувати в різних кристалічних формах (модифікаціях). Перехід від однієї модифікації до іншої називають *поліморфним перетворенням*. Поліморфізм спостерігається у багатьох металах: Fe, Mn, Co, Ti, Sn та ін. Кожна з поліморфних модифікацій, за незмінної природи атомів, що її утворюють, відрізняється від іншої розміщенням атомів у кристалічній ґратці. Окремі модифікації позначають літерами грецького алфавіту: α , β , γ , δ тощо. Кожна з модифікацій має свій температурний інтервал існування. Рівноважна температура (T_0) поліморфного (наприклад, $\alpha \leftrightarrow \gamma$) свідчить, що за умов повільного нагрівання чи охолодження вище чи нижче цієї температури, існують відповідні модифікації металу (α або γ). Поліморфне перетворення (як і кристалізація) відбувається шляхом утворення зародків нової фази і наступного їх зростання. При переході від однієї модифікації металу в іншу, змінюються будова кристалічної ґратки і властивості металу (твердість, пластичність, об'єм тощо). Так, при перетворенні білого олова (β -модифікація) на сіре (α -модифікація) об'єм його збільшується на 25 %. При цьому відбувається також зміна характеру міжатомного зв'язку від металевого (Sn_β) на ковалентний (Sn_α).

Найпоширеніший з металів - залізо - має за звичайних умов поліморфні модифікації з ОЦК і ГЦК-ґраткою. Модифікація α -заліза з ОЦК-ґраткою існує при температурах нижче 911°C і вище 1392°C (див. рис. 1.5). В інтервалі температур 1392 - 1539°C модифікацію з ОЦК-ґраткою позначають як δ -залізо. Модифікацію заліза з ГЦК-ґраткою називають γ -залізом. Вона існує в інтервалі температур 911-1392°C.

Якщо до заліза прикласти всебічний тиск 135 кбр, то утворюється поліморфна модифікація заліза з гексагональною ґраткою щільного пакування (ГЩП), яку називають ϵ -моди-

546

фікацією. Такої модифікації чистого заліза за нормального тиску не існує. Проте, якщо легувати залізо марганцем, рутенієм, іридієм, то в таких сплавах ϵ -модифікація стабільна в межах температур від абсолютного нуля до 200°C.

7. Що таке магнітне перетворення?

Деякі метали (Fe, Co, Ni) мають специфічну властивість - здатність до намагнічування (*феромагнетизм*), яка при нагріванні металів поступово втрачається. Повна остаточна втрата

феромагнітних властивостей відбувається за певної температури (точка Кюрі). Температура переходу з феромагнітного стану до парамагнітного для заліза становить 768°C, для кобальту - 1150°C, для нікелю - 360°C.

Магнітне перетворення є особливим типом перетворення, яке принципово відрізняється від поліморфного (алотропного). Воно не супроводжується перекристалізацією, тобто зміною типу кристалічної ґратки і утворенням нових зерен. З підвищенням температури та наближенням її до точки перетворення, магнітні властивості металу поступово втрачаються. При цьому збільшення швидкості нагрівання чи охолодження не впливає на положення точки Кюрі (перетворення не має температурного гістерезису). Під час перетворення змінюються електричні, магнітні, теплові властивості, а механічні та деякі фізичні - залишаються незмінними. Виходячи з сучасних уявлень, сутність магнітного перетворення пов'язують із взаємодією зовнішніх і внутрішніх електронних оболонок атомів металів.

8. Анізотропія та ізотропія, що це?

Кристалічні ґратки металів характеризує певне просторове розташування атомів, їхня кількість, взаємне розміщення і параметри ґраток. Розглядаючи розташування атомів у різних площинах кристалічної ґратки, можна констатувати різну насиченість атомами цих площин, різні відстані між атомами і сили

міжатомного зв'язку. Тому фізико-механічні властивості окремих кристалів (монокристалів) у різних напрямках кристалічної ґратки неоднакові. Різний рівень властивостей кристалів у різних кристалографічних напрямках називають *анізотропією*. Це характерна особливість будь-якого кристалічного тіла.

У аморфних тіл, на відміну від кристалічних, неупорядкована насиченість атомами у різних напрямках, тому вони мають однакові властивості у всіх напрямках, тобто *ізотропні*.

Реальні метали складаються із значної кількості по-різному орієнтованих у просторі кристалів (зерен), тобто є полікристалічними тілами. Довільна орієнтація кожного з численних кристалів призводить до того, що у будь-якому напрямку в металі розміщується приблизно однакова кількість незорієнтованих кристалів. Тому властивості таких полікристалічних металів у всіх напрямках усереднюються і стають практично однаковими (*квазіізотропія*). Проте, коли технологічні операції обробки металів (прокатування, кування, штампування) сприяють певній переважаючій кристалографічній орієнтації зерен, тоді полікристалічні метали також стають *анізотропними*. Так, наприклад, міцність і ударна в'язкість зразків сталі, вирізаних з листа вздовж і поперек прокатки, значно відрізняються. Відповідна термічна обробка сприяє утворенню більш однорідного квазіізотропного металу.

Просторове розміщення атомів у кристалічному тілі зумовлене його природою, характером міжатомних зв'язків, залежить також від температури і тиску. Тип зв'язку, який виникає між елементарними частинками в кристалі, визначається електронною будовою атомів, що вступають у певну взаємодію. Розрізняють чотири типи міжатомного зв'язку: йонний, ковалентний, ван-дер-ваальсовий і металевий.

9. Які типи міжатомного зв'язку існують у кристалах?

Йонний міжатомний зв'язок виникає в кристалах, до складу яких входять елементи, що значно відрізняються за валентністю. Йонний зв'язок базується на взаємному притягуванні протилежно заряджених йонів, що утворюються, коли атоми втрачають або приєднують електрони. Такий зв'язок має місце при утворенні кристалів хімічних сполук, наприклад, NaCl, KCl, FeO, MgS та інших. Так, при утворенні NaCl, атом натрію втрачає слабозв'язаний з ядром електрон (утворюється позитивно заряджений йон натрію), а атом хлору приєднує цей електрон до своєї зовнішньої електронної оболонки (утворюється негативно заряджений йон хлору). Кожен йон намагається оточити себе якомога більшою кількістю йонів протилежного знаку. У кристалі NaCl кожний, невеликий за розмірами, йон Na^+ оточений шістьма більшими за розмірами йонами Cl^- і навпаки. Йонні кристали мають високу температуру плавлення, значну міцність, крихкість.

Ковалентний зв'язок виникає тоді, коли атоми, що взаємодіють, об'єднують свої валентні (зовнішні) електрони і таким чином добудовують свою зовнішню електронну оболонку. Ковалентний зв'язок утворюється парою електронів, які належать одночасно двом сусіднім йонам. Для ковалентних кристалів характерні висока температура плавлення, високі твердість та пружність. За електричними властивостями ковалентні кристали відносять до напівпровідників та до діелектриків.

Ван-дер-ваальса сили зв'язку виникають між молекулами або нейтральними атомами в кристалах інертних газів, органічних сполук та деяких речовинах незалежно від природи атомів, що взаємодіють. Вони виявляються в усіх агрегатних станах речовин. Чим ближча відстань між молекулами, тим більша ван-дер-ваальсова взаємодія (у твердих тілах вона максимальна). Для таких молекулярних кристалів характерні низькі температури плавлення, за звичайних температур вони є діелектриками.

Основою поняття *металевого зв'язку* є уявлення про одночасне існування нейтральних атомів і йонізованих (тих, що втратили частину своїх валентних електронів). Кожен з атомів має рівні можливості щодо йонізації, тобто перехід електронів від нейтрального атома до йонізованого може відбуватися без витрат енергії. Тому у металі постійно здійснюється обмін електронами і завжди існує певна кількість електронів, які не належать на даний момент якомусь з атомів. Мізерно малий розмір електронів дозволяє їм досить вільно переміщуватися по всьому металевому кристалу. Тому кристал металу можна розглядати як просторову ґратку з позитивних йонів і нейтральних атомів, які знаходяться в атмосфері «електронного газу». Наявність вільних електронів зумовлює існування спільних для всіх металів властивостей: непрозорість, металевий блиск, високі електропровідність і теплопровідність.

Внутрішня кристалічна будова реальних металів і сплавів не є ідеальною, тобто періодичність розташування атомів (йонів) у кристалічній ґратці порушується існуючими *дефектами* - недосконаlostями її будови.

До таких дефектів відносять *точкові, лінійні та поверхневі мікрODEфекти*. Існують також *об'ємні макродефекти*.

Точкові дефекти мають невеликі розміри у трьох вимірах (не перевищують кількох діаметрів атомів). До них належать вакансії, міжвузлові та домішкові атоми та їхні комплекси (рис. 1.6). Вони значно впливають на властивості металів та сплавів.

Вакансія - це незайняте атомами місце у кристалічній ґратці. На місце вільного вузла у ґратці може переміщуватися інший атом, лишаючи нове вакантне місце, що сприяє дифузії і самодифузії металу.

10. Чим відрізняється реальна та ідеальна будова металевих кристалів?

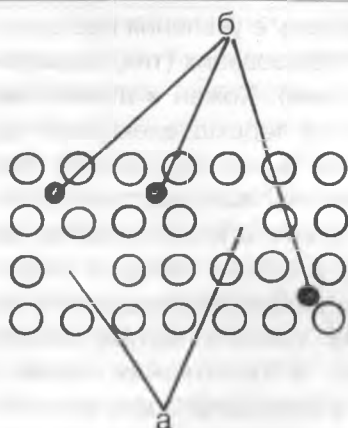


Рис. 1.6. Точкові дефекти в кристалічній ґратці: а - вакансії; б - міжвузлові атоми

Міжвузлові атоми - це атоми, які вийшли з вузла кристалічної ґратки і зайняли місце у міжвузлях.

Домішкові атоми - розміщуються у вузлах або між вузлами кристалічної ґратки металу (сплава).

Точкові дефекти, головними серед яких є вакансії, існують у кристалах за будь-якої температури. Проте кількість вакансій при кімнатній температурі незначна - приблизно 1 вакансія на 10^{18} атомів. При температурах, наближених до температури плавлення ($T_{пл}$) їхня кількість значно зростає і становить близько 1 вакансії на 10^4

атомів. Тому такі вакансії інколи називають «тепловими», на відміну від вакансій, що можуть утворюватися під впливом пластичної деформації чи бомбардування кристалу частинками з високою енергією опромінення.

Біля вільного вузла або міжвузлового атома ґратка викривлена, тому точковий дефект розглядають як центр стиснення чи розширення у пружному середовищі (рис. 1.7). Точкові дефекти можуть взаємодіяти між собою, утворювати пару вакансія - міжвузловий атом, а також пари вакансій. Енергетично вигідним є також комплекс з чотирьох вакансій, комплекс вакансія-атом, домішки, пара міжвузлових атомів.

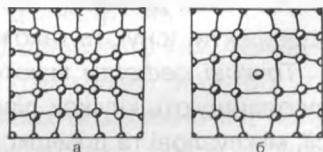


Рис. 1.7. Викривлення кристалічної ґратки біля вакансії (а) і навколо дислокованого атома (б)

Лінійні недосконалості ма-

ють малі розміри у двох вимірах і велику протяжність у третьому вимірі. Такі недосконалості називають **дислокаціями**. Це особливий вид розташування атомів. Уявімо собі кристал (рис. 1.8,а),

у якому з'явилася зайва атомна площина, яка не має продовження всередині кристалу. Її називають *екстраплощиною*. Край цієї площини утворює дефект ґратки - лінійну (крайову) дислокацію.

Біля дислокації виникають пружні викривлення ґратки і спостерігається зміщення атомів відносно їхніх нормальних положень. Проте вже на відстані кількох атомів ці зміщення стають незначними, мають пружний характер і розповсюджуються на чималу відстань. Найбільше зміщуються атоми, які розташовані біля краю зайвої площини. При цьому сусідня напівплощина може переходити у проміжні положення і трансформуватися в екстраплощину, утворюючи дислокацію вздовж крайових атомів.

Подібне переміщення дислокації може продовжуватися і надалі вздовж площини, розташованої перпендикулярно до екстраплощини. Викривлену площину навколо дислокації називають її *ядром* (розміри $\approx 10^{-9}$ м), а довжина екстраплощини, якщо вона проходить через кристал товщиною 1 см, сягає 10^{-2} м.

Порушення порядку розташування атомів може утворювати інший вид лінійного дефекту - *гвинтову дислокацію* (рис. 1.8,б). Дислокації характеризує енергія викривлення

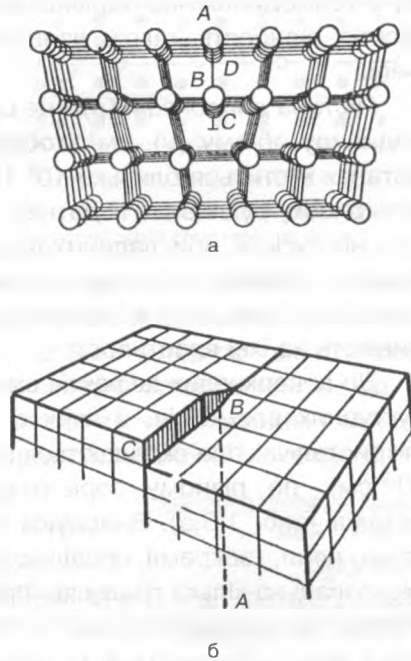
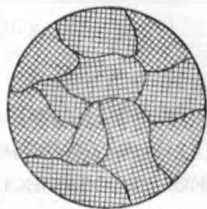


Рис. 1.8. Схема крайової (а) і гвинтової (б) дислокацій у кристалічній ґратці металу

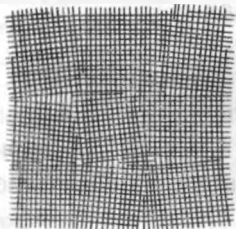
кристалічної ґратки. На відміну від точкових дефектів, концентрація яких є рівноважною для даної температури, дислокації при будь-яких температурах підвищують вільну енергію кристала і тому є термодинамічно нерівноважними дефектами. До лінійних дефектів відносять також ланцюжки вакансій та міжвузлових атомів.

Густина дислокацій (ρ) - це сумарна їхня довжина (ΣL) в см на одиницю об'єму (V), см^3 , тобто $\rho = \Sigma L / V$, см^{-2} . В реальних кристалах міститься близько 10^6 - 10^8 см^{-2} дислокацій. Дислокації мають високу рухливість і здатність до розмноження під впливом зовнішніх зусиль, прикладених до металу. Так, значна пластична деформація металу збільшує густину дислокацій до 10^{10} - 10^{12} см^{-2} . Густина дислокацій та їх розташування в об'ємі металів значно впливають на їхні властивості.

До поверхневих дефектів відносять границі зерен і границі структурних елементів, з яких складаються зерна (кристали). Полікристалічні тіла складаються з великої кількості дрібних (10^{-1} ... 10^{-5} см), по різному зорієнтованих відносно один одного кристалів (рис. 1.9,а). Внаслідок недосконалостей кристалічної ґратки, вони, зокрема, поділяються на фрагменти, які роззорієнтовані на кілька градусів. Фрагменти також складаються із субзерен (блоків кристалічних мікрооб'ємів) розміром 10^{-4} ... 10^{-5} см, будова яких наближається до відносно правильної (рис. 1.9,б). Межою зерен вважають перехідну зону між зернами завширшки



а



б

Рис. 1.9. Схеми різної орієнтації зерен у полікристалічному твердому тілі (а) і субзеренної структури металу (б)

до 10 міжатомних відстаней і називають *висококутовою*.

Межу між блоками зерен називають *малокутовою* - розорієнтування між ними дорівнює кільком

градусам. Межі зерен та блоків мають підвищену хімічну активність, містять скупчення дислокацій та домішкових атомів, порушені закономірності розташування атомів. До поверхневих відносять також дефекти пакування, пов'язані з відхиленням регулярності розташування атомних шарів (рис. 1.10).

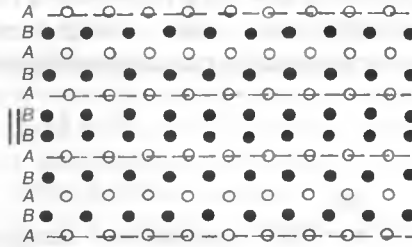


Рис. 1.10. Схема дефекта пакування у гексагональній кристалічній ґратці

До *об'ємних дефектів* належать скупчення точкових дефектів, які утворюють пори, а також вкраплення другої фази. Пористість утворюється на різних стадіях виготовлення металевих виробів. У литому металі вона виникає під час кристалізації. Пористість також є характерною ознакою матеріалів, виготовлених методами порошкової металургії.

Деформація - це зміна форми і розмірів твердого тіла під дією прикладеного до нього навантаження або внаслідок фізико-механічних процесів, що виникають у ньому.

Процес деформації металу під дією зовнішніх напружень складається з двох послідовних стадій - пружного і пластичного деформування. Пружне деформування зникає після зняття навантаження, пластичне - зберігається.

При *пружному деформуванні* під дією зовнішньої сили змінюється відстань між атомами у кристалічній ґратці. Зняття навантаження усуває причину зміни міжатомної відстані, атоми повертаються у вихідне положення і деформація зникає. Пружне деформування характеризує лінійна залежність між прикладеним зовнішнім напруженням (незначним) і деформацією відповідно до закону Гука. Це основний закон, який визначає

11. Що таке пружна і пластична деформації?

залежність між напруженнями у пружному тілі та деформаціями, викликаними цими напруженнями. При поздовжньому розтягуванні або стискуванні закон Гука має вигляд:

$$\sigma = E\delta$$

де:

$\sigma = P/F$ - (нормальне напруження),

P - розтягуюча сила;

F - площа перерізу зразка до випробування;

$\delta = \Delta L/L_0$ - (відносна деформація, тобто відношення абсолютного видовження до початкової довжини зразка),

ΔL - абсолютне видовження;

L_0 - початкова довжина зразка;

E - модуль пружності.

Закон Гука справедливий лише при напруженнях і деформаціях, що не перевищують певного порогу для даного матеріалу.

Модуль пружності - це характеристика опору матеріалів пружній деформації. Розрізняють модуль пружності при осьовому розтягуванні (E), який також називають модулем нормальної пружності чи модулем Юнга, та модуль зсуву (G) для деформації під дією дотичних напружень. При деформації зсувом закон Гука має вигляд:

$$\tau = G\gamma$$

де:

$\tau = P/F$ (дотичне напруження);

P - дотична сила;

F - площа шарів зсуву;

γ - кут зсуву;

G - модуль зсуву.

Різні матеріали мають неоднакові значення модулів пружності, проте співвідношення E/G у багатьох металів постійне і дорівнює приблизно 2,5. Модулі пружності технічних металів і

сплавів залежать від типу і параметрів кристалічної ґратки, визначаються силами міжатомного зв'язку, відносяться до структурно нечутливих характеристик і не залежать від мікроструктури металу. Модуль пружності полікристалічного заліза досить високий (135000 МПа), що пояснює широке застосування на практиці сплавів заліза. Пружна деформація відбувається при навантаженні металу нижче порогу пружності, тобто в межах дії закону Гука.

Поріг пружності відповідає напруженню, за якого залишкова деформація досягає 0.05 %.

Пластична деформація відбувається під дією зовнішніх навантажень (напружень), які перевищують поріг пружності металу. За пластичного деформування відхилення атомів значно перевищує міжатомні відстані й вони переміщуються на нові місця стійкої рівноваги. Такий метал, на відміну від пружно деформованого, зберігає залишкову деформацію і після зняття навантаження. Напруження, яке викликає залишкову деформацію 0,2 %, відповідає умовному порогу плинності (текучості) - $\sigma_{0.2}$. Під час пластичного деформування безперервно зростає опір металу і здатність його до подальшої пластичної деформації знижується. Таким чином, холодне пластичне деформування призводить до зміцнення металу, зниження його пластичності, електро- й теплопровідності, зростають залишкові напруження.

Зміну властивостей деформованого металу пояснюють зростанням викривлень і кількості дефектів кристалічної будови, появою внутрішніх напружень. Зміцнення металів при пластичному деформуванні називають *наклепуванням* або *нагартуванням*. Цей термін не слід плутати з гартуванням при термічній обробці.

Розглядають два механізми зміни кристалічної будови металу при пластичному деформуванні - деформацію зсувом і деформацію двійникуванням.

Зсув - це закономірне переміщення (ковзання) окремих частин металу без порушення їхньої цільності під дією зовнішнього навантаження. Він

12. Які механізми діють за умов пластичного деформування металів?

відбувається по певних площинах і напрямках кристалічної ґратки, які називають площинами і напрямками зсуву (ковзання). Поєднання будь-якої площини і одного з напрямів ковзання називають *системою ковзання*. В металах з ГЦК-ґраткою існує 12 систем ковзання по площинах $\{111\}$ і напрямках $\langle 110 \rangle$, в металах з ОЦК-ґраткою нараховують 48 систем ковзання.

Зсув починається тоді, коли дотичні напруження в площинах ковзання і в напрямках ковзання досягають критичної величини. Ковзання відбувається у тих зернах, де площина ковзання утворює кут 45° до напрямку діючої сили. Механізм зсуву розглядають як переміщення через кристал крайової дислокації вздовж площини ковзання (111) під дією зовнішнього напруження шляхом поперемінного розриву і поновлення міжатомних зв'язків у цій площині (рис. 1.11). Такий естафетний характер переміщення, коли енергія зовнішнього напруження послідовно передається від одного атома (йону) до іншого, зумовлює легкість пластичного деформування, а також невелику, порівняно з теоретичною, реальну міцність металів. Так, для заліза теоретичний опір зсуву складає 2300-11000 МПа, а реальний - 29 МПа. Це пояснюється дислокаційним механізмом пластичної деформації, коли ковзання по певній кристалографічній площині відбувається не одразу, а внаслідок послідовних переміщень дислокацій протягом певного часу. Для такого руху дислокації потрібні відносно невеликі напруження зсуву.

Зсув супроводжується спрямуванням площин у напрямку діючої сили. У площинах, де зсув уже відбувся, кристалічна ґратка викривлюється і метал зміцнюється. Тому подальше деформування можливе за рахунок зсуву в інших системах ковзання. В полікристалічному металі при підвищених ступенях деформації зерна витягуються і орієнтуються у напрямку діючого напруження (утворюється «волокниста структура»).

Інший механізм деформації - *двійникування* із симетричним зміщенням однієї частини кристалу відносно іншої під дією дотичних напружень, має місце за умов високої швидкості де-

формування і низьких температур. Спостерігається в металах з об'ємноцентрованою та гексагональною ґратками.

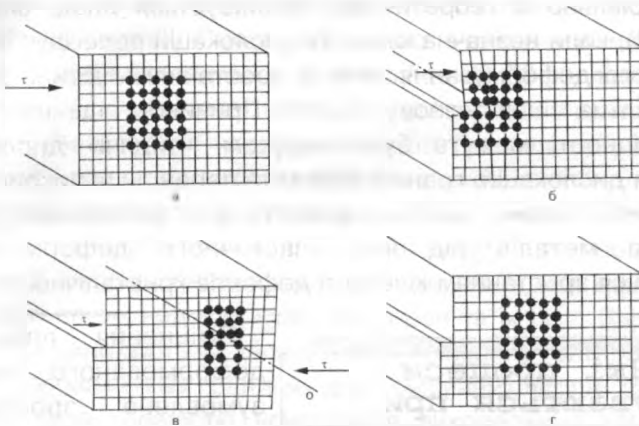


Рис. 1.11. Схема пластичного зсуву за дислокаційним механізмом: а-г - послідовність зсуву

Зміцнення металу під час пластичного деформування супроводжується поглинанням енергії. Більша частина енергії, що витрачається на деформування (~ 90-95 %), виділяється у вигляді тепла. Решта енергії деформування залишається в металі й зумовлює виникнення *внутрішніх (залишкових) напружень*. Розрізняють *напруження першого роду*, які врівноважуються в об'ємі



Рис. 1.12. Міцність кристалу залежно від кількості дефектів

мі всього металу; *напруження другого роду* - врівноважуються в об'ємах окремих зерен; *напруження третього роду* - у межах окремих елементів кристалічної будови (границь зерен та блоків зерен, площин ковзання, точкових та лінійних дефектів). Мікронапруження можна розглядати як наслідок мікро-викривлень кристалічної ґратки.

Зі збільшенням кількості дислокацій реальна міцність металів, порівняно з теоретичною, зменшується лише спочатку (рис. 1.12), коли незначна кількість дислокацій полегшує процес пластичного деформування. Але зі зростанням густини дислокацій, реальна міцність знову зростає. Причиною підвищення реальної міцності можуть бути нерухомі «сидячі» дислокації, скупчення дислокацій, границі блоків та зерен, інші викривлення кристалічної ґратки, які ускладнюють рух дислокацій. Отже, зміцнення металів під час пластичного деформування пояснюється зростанням кількості дефектів кристалічної будови.

13. Які процеси відбуваються при нагріванні пластично деформованого металу? Що таке повернення і рекристалізація?

Зміцнення пластично деформованого металу, зумовлене зростанням кількості дефектів і викривлень кристалічної ґратки, називають наклепуванням (нагартуванням). Пластично дефор-

мований метал у зв'язку з цим знаходиться у нерівноважному, термодинамічно нестійкому стані, за якого підвищується рівень вільної енергії. Тому в деформованому металі відбуваються процеси, спрямовані на досягнення більш врівноваженого, стабільного стану. Швидкість перебігу таких процесів значно збільшується за підвищеної температури.

Перехід деформованого нерівноважного стану металу до рівноважного відбувається за кілька етапів і зумовлений зниженням викривлень кристалічної ґратки, зняттям внутрішніх напружень шляхом відповідного переміщення атомів. За відносно низьких температур (нижче 0,3 температури плавлення) частково усуваються внутрішні напруження і відновлюються пружно викривлені кристалічні ґратки. Такі зміни у деформованому металі називають *поверненням* або *відпо-*

Будова, кристалізація і властивості металів

чинком. При цьому у мікроструктурі металу не спостерігається помітних змін, він зберігає волокнисту будову, розмір зерна не змінюється, майже повністю відновлюється рівень електроопору, коерцитивної сили. Проте, порівняно з вихідним наклепаним станом, зменшується міцність металу на 20-30 %, підвищується пластичність. Зміну властивостей при поверненні пояснюють зменшенням кількості точкових дефектів і дислокацій, частковим зниженням рівня залишкових мікронапружень.

Подальше підвищення температури зумовлює збільшення амплітуди коливань атомів і швидкість дифузійних процесів. Відбувається переміщення атомів, утворення нових центрів кристалізації, нових недеформованих зерен та їх ріст. Зародки нових зерен виникають на ділянках з найбільшою густиною дислокацій - переважно на границях деформованих зерен. Такий процес, за якого повністю усуваються викривлення кристалічної ґратки, внутрішні напруження і відбувається знеміцнення металу називають *рекристалізацією*.

Процес рекристалізації поділяють на два періоди - первинну і збиральну рекристалізацію. *Первинна рекристалізація* зводиться до утворення зародків і росту нових зерен з невикривленою кристалічною ґраткою. Рушійною силою утворення зародків і росту нових зерен є енергія, акумульована у деформованих об'ємах металу; система намагається перейти у стан з найменшим запасом вільної енергії.

Температура початку рекристалізації ($T_{\text{рекр.}}$) залежить від ступеня деформації металу. Чим вищий ступінь деформації, тим нижча температура рекристалізації. Крім цього температура початку рекристалізації залежить також від чистоти металу, природи сплаву і складає деяку частку від температури його плавлення: $T_{\text{рекр.}} = \alpha T_{\text{пл.}}$

Коефіцієнт $\alpha = 0,10-0,20$ для дуже чистих металів. Для металів технічної чистоти він становить 0,35-0,40, а для сплавів може досягати 0,70-0,80. У розрахунках температури початку рекристалізації необхідно враховувати, що її розмірність береться у кельвінах (K).

Розмір зерен при рекристалізації залежить від ступеня попередньої пластичної деформації та температури нагрівання. Чим більший ступінь деформації, тим дрібніші зерна формуються під час рекристалізації. Розміри зерен збільшуються при підвищенні температури рекристалізації.

Процес росту зерен за рахунок дрібніших суміжних називають *збиральною рекристалізацією*. Рушійна сила цього процесу - зміна вільної енергії границь зерен металу. Від розмірів зерен залежать деякі властивості металів, передусім, ударна в'язкість. Вона підвищується зі зменшенням розміру зерен.

14. Чим відрізняються процеси холодного і гарячого деформування (обробки тиском)?

При обробці металів тиском розрізняють холодне і гаряче деформування. Але це зовсім не означає, що при холодному деформуванні метал деформують без нагрівання, а при гарячому - в нагрітому стані.

Виходячи з процесів, що відбуваються під час деформації, зміни структури і властивостей металу, під *холодним деформуванням* слід розуміти таку обробку, після якої досягнуте деформацією зміцнення повністю зберігається. *Гарячою обробкою (деформацією)* тиском називають таку, під час якої деформаційне зміцнення (наклепування) майже повністю усувається рекристалізаційними процесами, що відбуваються в нагрітому деформованому металі. Отже, за гарячої обробки тиском, деформування здійснюють, нагріваючи метал вище температури початку рекристалізації ($T_{\text{рекр}}$). При цьому зміцнення металу не відбувається, оскільки наклепування усувається процесами рекристалізації. Для деяких легкоплавких металів (Pb, Sn) температура рекристалізації знаходиться нижче 0°C . Тому деформування їх навіть за кімнатної температури буде гарячою обробкою тиском. Для заліза і сталі обробка при 400°C буде холодною обробкою, тому, що $T_{\text{рекр}}$ заліза становить близько 450°C .

Надпластичність - це здатність металевих матеріалів до значної пластичної деформації

15. Що таке надпластичність?

без руйнування і зміцнення (наклепування) металу. Вона спостерігається у сплавах Fe, Ni, Ti, Cu, Mg, Zn за умов дуже повільного деформування зі швидкістю меншою за $10^2/\text{с}^{-1}$. Основною умовою переходу металу у надпластичний стан є одержання структури з дрібними (0,5-10,0 мкм) рівноосними зернами. Явище надпластичності спостерігається також за умов, коли температура деформування становить $0,4-0,5 T_{\text{пл}}$.

Структуру металу, здатну до надпластичного деформування, одержують різними методами: гартуванням з наступним старінням, швидкісним рекристалізаційним відпалюванням, обробкою тиском з високим ступенем деформації, термомеханічною обробкою тощо. Надпластичність спостерігаємо за умов відсутності локальної деформації. Механізм надпластичності не вилучає також зернограничного ковзання зерен металу. Явище надпластичності в техніці використовують у об'ємному ізотермічному штампуванні, при пневмоформуванні. Надпластичність дозволяє за одну технологічну операцію одержувати деталі складної форми, підвищувати коефіцієнт використання металу.

Залежно від зовнішніх умов (температура, тиск), метал може знаходитися у певному агрегатному стані - твердому, рідкому, газоподібному. Перехід металу з одного агрегатного стану в інший відбувається за певних (критичних) температур,

16. Які умови визначають існування того чи іншого агрегатного стану металу?

які змінюються залежно від тиску (рис. 1.13). Нижче лінії АБГ метал буде стійким у газоподібному стані, у рідкому - в межах ВБГ, у твердому - у межах АБВ. Лінії діаграми відповідають умовам двофазної рівноваги, точка перетину ліній (В) - трифазної.

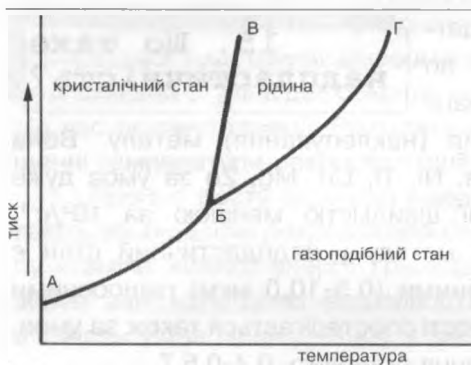


Рис. 1.13. Діаграма фазової рівноваги металу

При температурах і тиску, що позначені лінією БВ, можливе рівноважне співіснування рідини і твердої фази (кристалів). При постійному тиску температура переходу металу з одного агрегатного стану в інший чітко визначена. Так, температура плавлення заліза при тиску 1 ат. дорівнює 1539°C , кипіння - 2880°C . Той, чи

інший стан речовини можна пояснити законом термодинаміки, відповідно до якого будь-яка система прагне до найбільш стійкого термодинамічного стану, тобто до найменшого запасу вільної енергії (рис. 1.14).

За своїми властивостями і будовою метал у рідкому стані нагадує більше твердий, ніж газоподібний, особливо при температурах, наближених до температури кристалізації.

При плавленні твердих тіл відносно збільшення об'єму перевищує 10 %, а при випаровуванні середня відстань між частинками речовини збільшується у десятки разів. Теплоємність кристалів майже не змінюється при плавленні, тобто в рідині зберігається характер теплового руху атомів, які коливаються навколо тимчасових положень рівноваги. Скрита теплота плавлення є набагато меншою порівняно з теплотою випаровування.

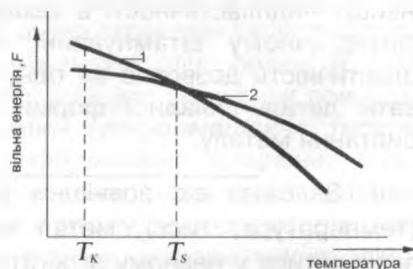


Рис. 1.14. Зміна вільної енергії металу у рідкому (1) і твердому (2) станах залежно від температури

Кристалізацією називають процес переходу металу з рідкого стану в твердий, коли в охолоджуваній рідині з'являються центри кристалізації, утворюються і

зростають кристали. Таке перетворення, як і будь-яке самочинне перетворення, можливе, якщо існування нового стану стає енергетично доцільним, тобто відповідає мініимальному запасу вільної енергії.

Зміна температури викликає зміну запасу вільної енергії, тобто термодинамічного потенціалу системи (див. рис. 1.14). Вище температури T_s меншу вільну енергію має речовина у рідкому стані, а нижче T_s - у твердому стані. Отже, вище T_s речовина знаходиться у рідкому стані, а нижче T_s - у твердому, кристалічному. При температурі, що дорівнює T_s , вільні енергії рідкого і твердого стану однакові, тому температуру T_s називають *рівноважною температурою* кристалізації.

Кристалізація можлива тоді, коли вільна енергія речовини у твердому стані стає меншою за її вільну енергію у рідкому стані. Отже, кристалізація відбувається, коли метал переохолоджується до температури, нижчої за рівноважну. Таким чином, переохолодження завжди має місце при кристалізації.

Д. К. Чернов показав, що кристалізація складається з двох процесів: утворення зародків (центрів кристалізації) та росту кристалів з цих центрів. Обидва процеси характеризуються власними швидкостями, які й становлять параметри кристалізації. *Першим параметром кристалізації* є швидкість утворення зародків (C). Позначається кількістю зародків, що утворюються в одиниці об'єму за одиницю часу і вимірюється у $\text{см}^3/\text{с}^{-1}$. *Другий параметр* (n) - лінійна швидкість росту кристалів - характеризує зміну лінійних розмірів кристалів і вимірюється в $\text{см}/\text{с}$. З підвищенням ступеня переохолодження величини цих параметрів кристалізації зростають. Темп зростання кількості зародків у більшості випадків переважає темп зростання лінійної швидкості їх росту. Від співвідношення параметрів C і n залежать розміри зерен в полікристалічних металевих матеріалах.

17. Як відбувається процес кристалізації?

За теорією Таммана, кількість зерен N пропорційна швидкості утворення центрів кристалізації n і обернено пропорційна швидкості росту C , тобто $N = K n / C$, де K - сталий коефіцієнт.

Розмір зерна значною мірою впливає на механічні та інші властивості металів. Дрібнозернистий метал має вищі характеристики в'язкості й пластичності.

18. Що таке критичний зародок кристалізації? Як він залежить від переохолодження?

Утворення зародків - центрів кристалізації - змінює термодинамічний потенціал системи. Він зменшується при переході рідини в кристалічний стан і

зростає внаслідок виникнення поверхні розподілу між рідиною та кристалічним зародком. Міжфазна поверхня, яка виникає при утворенні зародку, характеризується надлишковою енергією, що призводить до збільшення термодинамічного потенціалу системи. Зародок може зберігатися і в подальшому зростати тільки за умови зниження загальної вільної енергії. Це означає, що повинен існувати певний критичний розмір зародка, нижче якого співвідношення поверхні й об'єму для малих частинок досить велике, щоб могла виконуватися наведена вище умова.

Мінімальний розмір зародка r_k , здатного до зростання за певних температурних умов, називають *критичним розміром зародка*, а сам зародок - *критичним* чи *рівноважним*. За температур, близьких до температур плавлення, розмір критичного зародка повинен бути досить великим і вірогідність його утворення низька. Зі збільшенням ступеня переохолодження зростає різниця вільних енергій твердого і рідкого станів (рис. 1.14), тоді як поверхнева енергія на межі між зародками і рідиною змінюється несуттєво.

Таким чином, зі збільшенням ступеня переохолодження чи зі зниженням температури кристалізації, розмір критичного зародка зменшується.

Графічне зображення залежності зміни вільної енергії від радіусу частинок r для різних ступенів переохолодження наведено на рис. 1.15. Отже, зі збільшенням ступеня переохолодження, критичний розмір зародка зменшується, тобто схильними до зростання

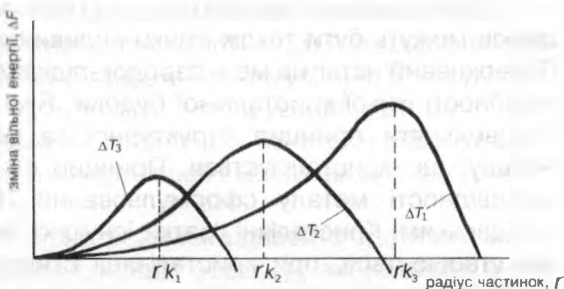


Рис. 1.15. Залежність зміни вільної енергії (ΔF) від радіусу частинок (r) для різних ступенів переохолодження, $\Delta T_3 > \Delta T_2 > \Delta T_1$

стають зародки невеликих розмірів, збільшується кількість зародків та лінійна швидкість їхнього росту.

Утворення зародків кристалізації

на поверхні будь-якого твердого тіла, що межує з рідиною, на відміну від розглянутого вище гомогенного (самочинного) процесу, називається гетерогенним (несамочинним) зародкоутворенням. Воно відбувається в умовах значно меншого переохолодження рідини. Полегшується зародкоутворення в цьому випадку тоді, коли поверхневий натяг на межі між зародком і твердим тілом менший, ніж на межі зародок-рідина.

19. Які фактори зумовлюють гетерогенне (несамочинне) утворення зародків кристалізації?

Чим нижчий рівень поверхневого натягу на межі двох фаз, тим меншим буде відхилення енергії, необхідної для утворення зародка, від середнього її значення. Отже, тим більшим буде кількість зародків, що можуть утворитися і досягти критичного розміру. Це пояснює гетерогенне утворення зародків кристалізації за меншого переохолодження розплаву. Потрібні для цього сторонні тверді частинки (неметалеві включення, інтерметалічні фази тощо) майже завжди присутні при кристалізації реальних металів.

Своєрідною «підкладкою» для гетерогенного утворення зародків можуть бути також стінки виливної або ливарної форми. Поверхневий натяг на межі зародок-підкладка зменшується у разі подібності їхньої кристалічної будови. Будова підкладки повинна задовольняти принцип структурної та розмірної відповідності металу, що кристалізується. Принцип структурної та розмірної відповідності металу сформульований П. Данковим і С. Кобієвським. Кристалічні ґратки існуючої твердої фази і зародка, що утворюється, при кристалізації стикаються подібними кристалографічними площинами, параметри яких відрізняються мінімально. Зародок кристалографічно орієнтується щодо частинки-підкладки. Наприклад, домішки титану в алюмінії сприяють утворенню дрібних частинок $TiAl_3$, рівномірно розподілених у розплаві. Вони поліпшують утворення зародків, оскільки їх тетрагональна кристалічна ґратка добре стикається з кристалографічною площиною (001) ГЦК-ґратки алюмінію. Тріщини і мікропори на поверхні частинки-підкладки також полегшують гетерогенне утворення зародків. Перегрівання рідкого металу знижує швидкість гетерогенного зародкоутворення у зв'язку з частковим розчиненням (розплавленням) підкладок або їхньої дезактивації.

Уведення до рідкого металу нерозчинних твердих частинок з відповідною кристалічною будовою сприяє гетерогенному утворенню зародків. Уведення поверхнево-активних речовин, що знижують поверхневий натяг на межі рідина-зародок, полегшує гомогенне зародкоутворення.

20.3а якими характеристиками оцінюють властивості металів?

Вироби машинобудування у процесі експлуатації піддаються впливу різного роду механічних, фізичних і хімічних факторів. Це зумовлює певні вимоги щодо комплексу основних характеристик

властивостей металів і сплавів. Вони визначають відповідність обраного матеріалу розрахунковим навантаженням у проектуванні деталей і забезпечують надійність їхньої роботи. Розрізняють механічні властивості, технологічні, фізичні й хімічні.

Поширення набули методи визначення *механічних властивостей* металів і сплавів. Механічні властивості матеріалів визначають, випробовуючи їх на твердість, розтягування, стискування, кручення, згин, ударну в'язкість, зношування, втому тощо. Випробовують спеціально виготовлені зразки стандартної форми і розмірів на спеціальних приладах і машинах для одержання потрібних характеристик.

До *технологічних характеристик* відносять здатність металів сприймати технологічні операції обробки, які надають виробам потрібної форми, розмірів і властивостей. Основні технологічні властивості металів - це оброблюваність різанням, здатність до холодної та гарячої обробки тиском (прокатування, кування, штампування), ливарні властивості, зварюваність, прогартуваність тощо. Технологічні властивості визначають, використовуючи відповідні технологічні проби.

До *фізичних властивостей* металів належать щільність, електропровідність, теплопровідність, намагнічуваність, холодноламкість тощо. Фізичні властивості, як і механічні, відіграють важливу роль у виборі металевих матеріалів.

Хімічні властивості металів і сплавів характеризують їхню здатність хімічно взаємодіяти з оточуючим робочим середовищем - утворювати сполуки, розчинюватися, піддаватися корозії або чинити опір діям агресивного середовища.

Найпоширенішим простим і швидким методом механічних випробувань є вимірювання твердості. Це дозволяє без руйнування зразка (виробу) досить точно контролювати якість матеріалу, знаходити відповідність цій характеристиці, інших механічних властивостей.

Твердість - це властивість матеріалу опиратися місцевому пластичному деформуванню при контактній дії на нього більш твердого тіла (індентора). Існує кілька методів визначення твердості: метод втискування, відскоку, дряпання, метод маятника тощо. Широкого поширення

21. Як визначають характеристики основних механічних властивостей металевих матеріалів?

набув *метод* вимірювання твердості *втискуванням*. При цьому індентор певної форми (піраміда, конус, кулька), виготовлений з твердого матеріалу (алмаз, гартована сталь, твердий сплав) втискають при навантаженні у поверхню металу. Число твердості визначають, виходячи з показників залишкової деформації вимірюваного зразка в умовних одиницях.

Метод Брінелля зводиться до статичного вдавлювання у поверхню вимірюваного матеріалу під навантаженням P в Н (кГс) загартованої сталеві кульки певного діаметру D , мм. За величиною діаметра відбитка кульки d , мм (глибина h), визначають число твердості, користуючись виразом

$$HB = P / F,$$

де: F - площа поверхні відбитка кульки, мм².

Позначивши площу сферичного відбитку через діаметр кульки:

$$F = (\pi D / 2) (D - \sqrt{D^2 - d^2}),$$

одержимо формулу, за якою можна визначити твердість:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Твердість за Брінеллем (HB) визначають у кГс/мм² або в МПа. Навантаження, його тривалість та діаметр кульки обирають відповідно до таблиці 1.2.

Вимірювання твердості за *методом Роквелла* виконують втискуванням у поверхню досліджуваного зразка алмазного конусу з кутом при вершині 120° або загартованої сталеві кульки діаметром 1,59 мм. Втискування алмазного конусу або кульки здійснюють, прикладаючи два послідовних навантаження - попереднє P_0 , яке дорівнює 0,1 кН (10кГс), і основне P_1 . Сумарне або загальне навантаження P при втискуванні алмаза становить 0,6 кН (60 кГс) або 1,5 кН (150 кГс). При втискуванні кульки P дорівнює 1 кН (100 кГс). Відповідно цим навантаженням, прилад оснащений трьома шкалами: чорні А і С та червона В. Шкалу А використовують у вимірах виробів з дуже високою поверхневою

Будова, кристалізація і властивості металів

твердістю (цементовані, азотовані тощо) і твердих сплавів з твердістю до 85 HRA. При вимірюваннях твердості загартованих сталей користуються шкалою С (до 67 HRC). Шкалу В використовують при вимірюванні твердості незагартованих сталей кольорових металів і сплавів (до 100 HRB). Числа твердості за Роквеллом визначають в умовних одиницях.

Таблиця 1.2

**Залежність діаметра кульки і навантаження
від твердості й товщини зразка**

Матеріал	Твердість HB, кГс/мм ²	Товщина зразка, мм	Діаметр кульки, мм	Навантаже- ння, кГс	Тривалість наванта- ження, с
Чорні метали	140- 450	Більше 6	10	3000	10
		6-3	5	750	
		Менше 3	2,5	187,5	
	Менше 140	Більше 6	10	1000	10
		6-3	5	250	
		Менше 3	2,5	62,5	
Кольо- рові метали	35-130	Більше 6	10	1000	30
		6-3	5	250	
		Менше 3	2,5	62,5	
	8-35	Більше 6	10	250	60
		6-3	5	62,5	
		Менше 3	2,5	15,6	

Вимірювання твердості за методом Віккерса здійснюють втискуванням у поверхню металу (шліфовану чи поліровану) чотиригранної алмазної піраміди з кутом між гранями 136° . Тривалість навантаження при випробуваннях чорних металів 10-15 с, кольорових - 30 с. Величина навантаження 10, 30, 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 1200 Н. Зі збільшенням навантаження зростає глибина проникнення алмазної піраміди в метал. Так при вимірюванні твердості тонких зміцнених шарів після азотування або борування використовують навантаження 50 або 100 Н. Товщина зразка для вимірів не повинна бути меншою за 1,5 діагоналі відбитка піраміди. Число твердості за Віккерсом визначається відношенням навантаження P , прикладеного на одиницю поверхні відбитку:

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 18,54 \frac{P}{d^2} = H / \text{мм}^2,$$

де: P - навантаження на піраміду H , яке добирають з таблиці;

α - кут між протилежними гранями піраміди (136°);

d - середньоарифметичне довжини або діагоналей відбитку піраміди після зняття навантаження (мм).

Для позначення твердості за методом Віккерса необхідно вказувати і тривалість навантаження, якщо вона більша чи менша 10-15 с. Наприклад, 10/30-500 HV означає число твердості за Віккерсом 500, одержане вимірюваннями при навантаженні 10 кГс, тривалість навантаження - 30 с.

Між одиницями твердості, одержаними вимірюванням різними методами, існує відповідна кореляція. Існують таблиці переведу чисел твердості. Так, наприклад, твердість 60 HRC відповідає 720 HV. Числа твердості за Брінеллем і Віккерсом мають однакові одиниці вимірювання Н/мм^2 (кГс/мм^2) і для матеріалів з твердістю до 4000 НВ практично збігаються.

Більшість характеристик механічних властивостей металів

Людона, кристалізація і властивості металів

визначають шляхом статичних випробувань стандартних зразків на розтягування. Їх здійснюють на розривних машинах, які визначають видовження зразків під час деформації. При випробуваннях зразок розтягується (деформується) вздовж його поздовжньої осі. Результати випробувань унаочнює діаграма навантаження - деформація (рис. 1.16), на якій по осі ординат підкладають навантаження, а по осі абсцис - абсолютне видовження. Пружну деформацію на діаграмі характеризує пряма лінія. На цій ділянці спостерігається пропорційність між навантаженням і видовженням. Умовне навантаження, за якого вперше залишкові деформації досягають певної малої величини, називають *порогом пружності* $\sigma_{пц}$. З підвищенням навантаження порушується пропорційність між напруженням і деформацією, поруч з пружними деформаціями виникають пластичні. Далі зразок деформується без збільшення розтягуючого навантаження. Горизонтальна ділянка плинності на діаграмі визначає *поріг плинності (текучості)* матеріалу - $\sigma_{т}$, МПа. Цю характеристику іноді позначають також $\sigma_{0,2}$, оскільки вона відповідає напруженню, що викликає залишкову деформацію 0,2 %.

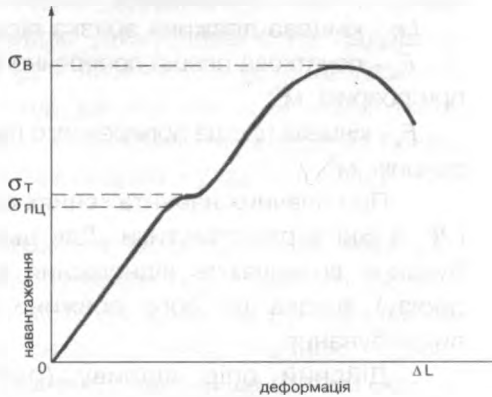


Рис. 1.16. Діаграма розтягування маловуглецевої сталі

Максимальне напруження, яке може витримати зразок до руйнування визначає *поріг міцності* - $\sigma_{в}$, МПа.

Випробуванням при розтягуванні визначають також *пластичність металу*, тобто здатність одержувати залишкову пластичну деформацію без руйнування. Пластичність характеризують:

відносне видовження δ і відносне звуження Ψ зразка при розриві під час випробування розтягуванням. При цьому:

$$\delta = \frac{L_k - L_o}{L_o} 100 \% ; \quad \Psi = \frac{F_o - F_k}{F_o} 100 \% ,$$

де: L_o - початкова довжина зразка до випробування, м;

L_k - кінцева довжина зразка після його розриву, м;

F_o - початкова площа поперечного перерізу на ділянці звуження при розриві, м²;

F_k - кінцева площа поперечного перерізу на ділянці звуження при розриві, м².

При значних навантаженнях важливі не відносні значення δ і Ψ , а їхні характеристики. Для цього в кожний момент випробування визначають відношення зміни вихідної довжини (перерізу) зразка до його довжини (перерізу) у даний момент випробування.

Дійсний опір відриву (руйнування) позначають S_k і визначають як відношення зусилля на момент руйнування (P_k) до перерізу зразка у місці розриву (F_k), тобто:

$$S_k = P_k / F_k$$

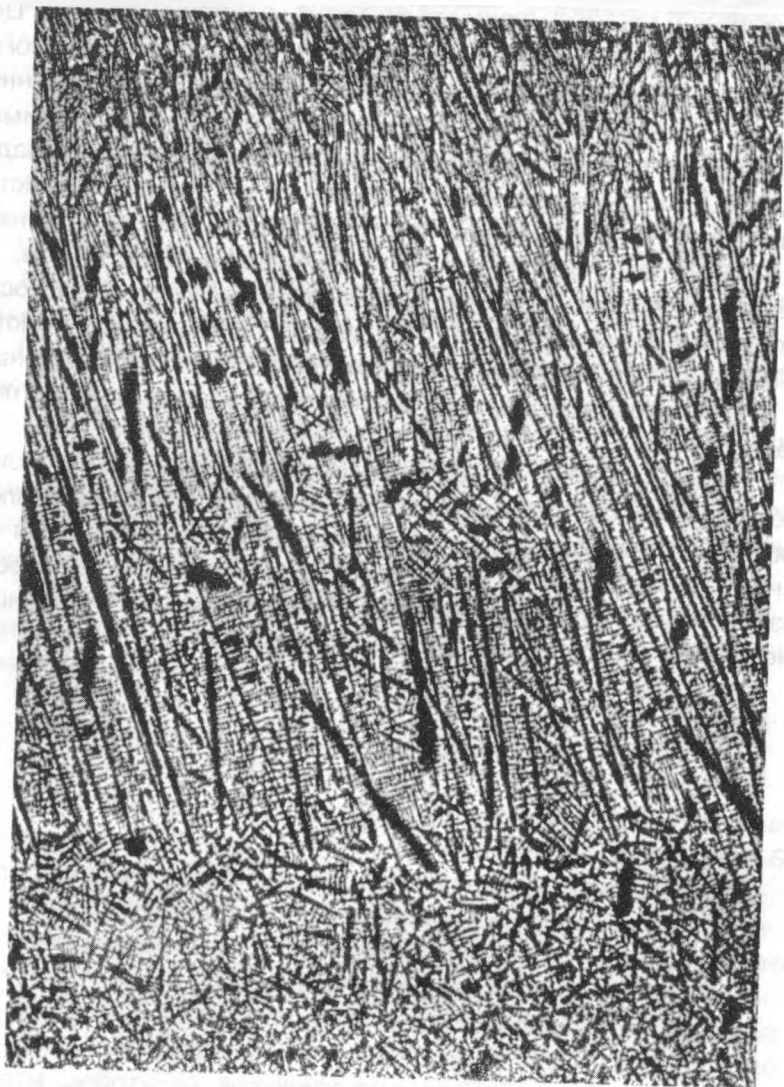
За крихкого руйнування S_k визначає дійсний опір відриву або крихку міцність, тоді як при в'язкому руйнуванні σ_b і S_k характеризують опір значному пластичному деформуванню.

Розглянуті характеристики твердості, міцності та пластичності є базовими і характеризують властивості конструкційних матеріалів у стані постачання, а також після термічної обробки.

Динамічні методи випробування застосовують при визначенні в'язкості матеріалів. В'язкість - це властивість металу поглинати роботу дії зовнішніх сил за рахунок пластичної деформації. Її визначають при випробуваннях ударним згином стандартних прямокутних зразків з надрізом на маятниковому

копірі. Характеристикою в'язкості металів є ударна в'язкість. Це відношення роботи руйнування ударного зразка до площі його поперечного перерізу у місці надрізу. Одиниці вимірювання ударної в'язкості Дж/м², МДж/м² або кГс/см². Чинними стандартами передбачені ударні зразки з різною формою надрізу: з U-подібним надрізом радіусом 1 мм ударну в'язкість позначають KCU; V-подібний надріз радіусом 0,25 мм та кутом 45° - KCV. Якщо концентратором руйнування є не надріз, а спеціально наведена тріщина (для визначення ударної в'язкості відповідальних конструкцій), тоді ударну в'язкість позначають KCT. Для оцінки в'язкості крихких матеріалів з твердістю понад 50 HRC застосовують зразки без надрізу і ударну в'язкість позначають KS.

Ударна в'язкість - це інтегральна характеристика, яка складається з роботи зародження тріщини (a_z) і роботи розповсюдження тріщини (a_p). Схильність до крихкого руйнування за даних температурних умов випробування значною мірою визначає робота поширення тріщини. Чим більша a_p , тим менша ймовірність раптового крихкого руйнування металу.



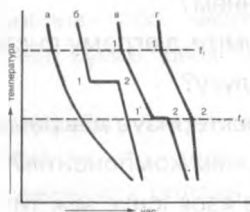
Зона стовпчастих кристалів у нижній третині виливка (5 т) середньовуглецевої сталі

РОЗДІЛ 2

Діаграми стану металевих систем

2

система
компонент
фаза
діаграма стану
термічний аналіз
структура
розчинність
хімічна сполука
твердий розчин
евтектика
перитектика



Питання, висвітлені у розділі 2

1. Що таке діаграма стану, система, компонент, фаза?
2. За якими принципами будуються діаграми стану?
3. Що характеризує діаграми фазової рівноваги компонентів, необмежено розчинних у рідкому стані та нерозчинних у твердому?
4. Як змінюється структура сплавів відповідно до діаграми стану?
5. У чому суть правила відрізків?
6. Які особливості діаграми стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані?
7. Чим відрізняються діаграми стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані?
8. Що характеризує діаграми стану сплавів, що утворюють стійку хімічну сполуку?
9. Які особливості діаграми стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані й перитектичним перетворенням?
10. Як розуміти діаграму системи, що утворює нестійку хімічну сполуку?
11. Що характеризує діаграму стану сплавів з поліморфним перетворенням компонентів?
12. Який зв'язок існує між типом діаграми і властивостями сплавів?

Діаграма стану сплавів - це графічне зображення зміни фізичного стану, структури і фазового складу сплавів залежно від температури і концентрації компонентів, що утворюють дану систему.

1. Що таке діаграма стану, система, компонент, фаза?

Система - це обрані для спостереження впливу певних факторів (температури, тиску) метали або металеві сплави. Систему називають рівноважною, якщо перетворення в ній при нагріванні й охолодженні відбуваються зворотно, а рівноважні умови досягаються за незначних ступенів перегріву чи переохолодження.

Компонент - незалежна складова частина системи (сплаву). Компонентами можуть бути хімічні елементи (метали, неметали) і хімічні сполуки. Чистий метал можна розглядати як однокомпонентну систему, сплав двох металів - як двокомпонентну систему тощо. Хімічні сполуки розглядаються як компоненти лише у разі їхньої стійкості (не дисоціюють) в досліджуваному інтервалі температур.

Фаза - це хімічно однорідна частинка системи, відділена від інших частин (фаз) поверхнею розділу. При переході через поверхню розділу різко змінюються хімічний склад, фізичний стан, структура і властивості фази. Фазами можуть бути хімічні елементи, чисті метали, тверді розчини, хімічні сполуки. За агрегатним станом фази бувають твердими, рідкими, газоподібними. Однорідна речовина, або чистий метал, є однофазною системою, а механічна суміш двох компонентів - двофазною.

Сплав - речовина, яку одержують поєднанням (сплавленням, спіканням, електролізом тощо) двох або більше елементів. Порівняно з чистими металами сплави мають більш цінний комплекс властивостей - механічних, фізичних, технологічних.

У рідкому стані компоненти сплаву розчиняються один в одному необмежено, утворюючи рідкий розчин (розплав). У

твердому стані їхня взаємна розчинність змінюється. Виходячи з цього, сплави у твердому стані можуть складатися з таких фаз: тверді розчини, хімічні сполуки, механічна суміш компонентів.

Тверді розчини - це фази, в яких один компонент сплаву зберігає свою кристалічну ґратку (розчинник), а атоми іншого компонента (розчинюваного) розташовуються в цій ґратці, змінюючи її параметри. Якщо атоми розчинюваного компонента займають у кристалічній ґратці місця атомів розчинника, то утворюється твердий розчин заміщення. Якщо ж атоми розчинюваного елемента розміщуються в порожнинах кристалічної ґратки між атомами розчинника, тоді утворюються тверді розчини втілення. Утворення того чи іншого твердого розчину пов'язано з типом кристалічної ґратки і співвідношенням атомних радіусів компонентів.

Хімічні сполуки утворюють компоненти з великою різницею в електронній будові їхніх атомів та кристалічних ґраток. Вони відрізняються від твердих розчинів конкретним співвідношенням числа атомів компонентів, яке відповідає стехіометричній пропорції (A_nB_m). Інші характерні ознаки хімічної сполуки: кристалічна ґратка сполуки має іншу будову, ніж кристалічні ґратки компонентів; постійну температуру плавлення (дисоціації); утворення сполуки супроводжується значним тепловим ефектом (крива охолодження подібна кривій чистого елемента).

На практиці важливо знайти стан і структуру сплавів залежно від зміни температури і концентрації компонентів, що їх утворюють. Такий зв'язок наочно демонструють діаграми стану, побудовані на основі результатів експериментів з використанням методів термічного, магнітного, металографічного та інших аналізів. Широко для цього використовується термічний метод. Він базується на тому, що будь-які зміни в стані металу або сплаву (фазові, структурні перетворення) супроводжуються тепловими ефектами. Температури, за яких відбуваються зміни стану (перетворення) сплавів називають критичними (тем-

Діаграми стану металевих систем

пература плавлення - $T_{пл}$, температура кристалізації - $T_{кр}$ тощо). Для побудови діаграм стану необхідно знати критичні температури, що визначають на основі аналізу швидкостей охолодження (нагрівання) сплавів даної системи, графічно зображених у координатах «температура - час» (рис. 2.1).

При охолодженні аморфного тіла (смола, скло) його температура падає поступово і безперервно, тобто конкретна температура плавлення не фіксується (рис. 2.1,а). Кристалічні ж речовини (метали, сплави) мають певну фіксовану температуру плавлення (при нагріванні), або температуру кристалізації (при охолодженні). Під час кристалізації виділяється внутрішня теплота кристалізації, що призводить до зменшення швидкості охолодження сплаву (при утворенні твердого розчину), або тимчасової зупинки падіння температури (при утворенні механічної суміші або хімічної сполуки). Твердіння чистих металів відбувається за постійної температури (рис. 2.1,б), а сплавів - в інтервалі температур (рис. 2.1,в,г).

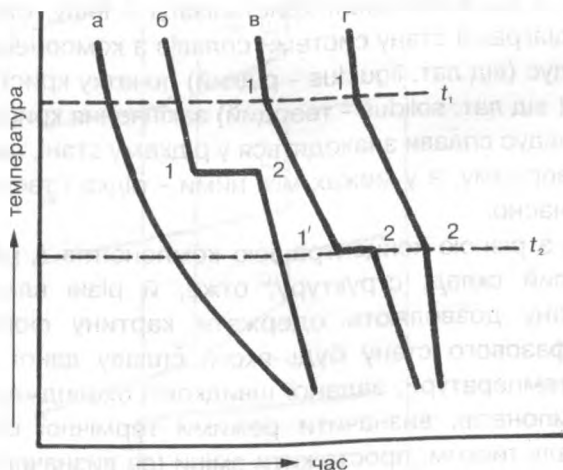


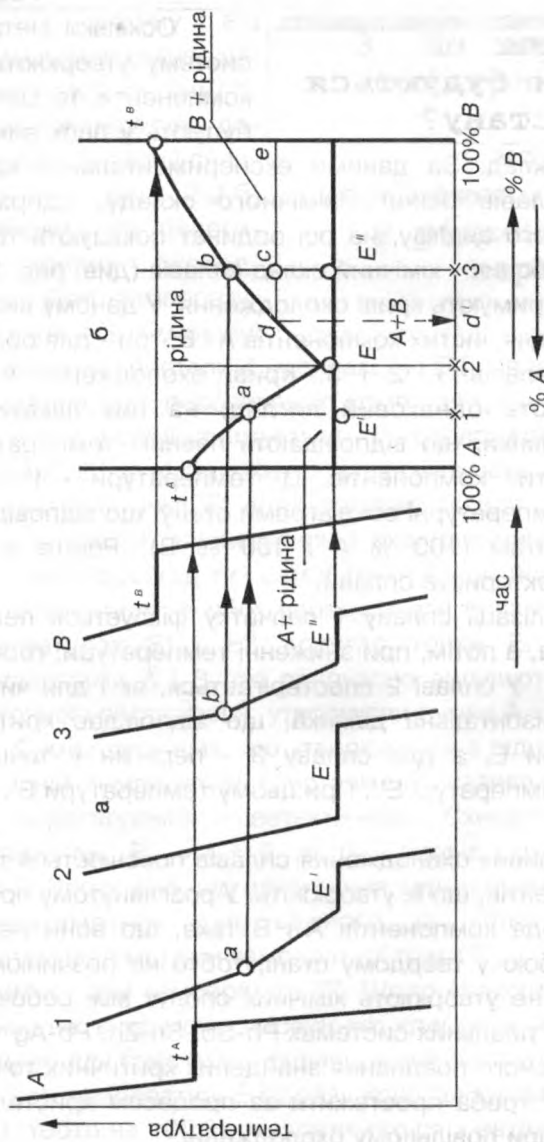
Рис. 2. 1. Графіки охолодження при кристалізації: а - аморфного тіла; б - кристалічного тіла (чистого металу); в - сплаву з евтектикою, г - сплаву з утворенням твердого розчину

Початок і кінець інтервалу визначають точки перегину на графіку охолодження (див. рис. 2.1, точки 1,2,), які характеризують зміну швидкості охолодження розплаву (початок і кінець перетворень) і називаються критичними точками або температурами.

Побудова діаграми стану зводиться до експериментального одержання серії графіків охолодження розплавів даної системи з різним (завданим) співвідношенням (вмістом) компонентів і визначення за ними критичних температур фазових перетворень. Далі для побудови діаграми стану на осі абсцис відкладають концентрацію (вміст) компонентів досліджуваних сплавів (рис. 2.2).

Крайня точка ліворуч по осі концентрації відповідає 100 % компонента А і 0 % компонента В (початок осі абсцис), а крайня точка праворуч відповідає 100 % компонента В і 0 % компонента А. Значення температури відкладають на осі ординат. У цих координатах будують графіки охолодження чистих компонентів та їхніх сплавів. З'єднуючи всі точки початку кристалізації сплавів в одну лінію, а всі точки кінця кристалізації в іншу, одержують основні лінії діаграми стану системи сплавів з компонентів А і В. Це лінія ліквідус (від лат. *liquidus* - рідкий) початку кристалізації і лінія солідус (від лат. *solidus* - твердий) закінчення кристалізації. Вище лінії ліквідус сплави знаходяться у рідкому стані, нижче лінії солідус - у твердому, а у межах між ними - рідка і тверда фази існують одночасно.

Сплави з різною концентрацією компонентів А і В мають різний фазовий склад, структуру, отже, й різні властивості. Діаграми стану дозволяють одержати картину формування структури і фазового стану будь-якого сплаву даної системи залежно від температури, заданої швидкості охолодження, концентрації компонентів; визначити режими термічної обробки і обробки металу тиском; простежити зміни (за визначених умов) певних фізичних і механічних властивостей.



2. 2. Схема побудови діаграми стану двокомпонентної системи (A-B) з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані і нерозчинних у твердому: а - графіки охолодження, одержані методом термічного аналізу; б - діаграма фазової рівноваги компонентів А і В.

2. За якими принципами будуються діаграми стану?

Оскільки металеву систему утворюють два компоненти, то діаграму будують у двох вимірах:

температура - склад. За даними експериментальних кривих охолодження сплавів різного хімічного складу, одержаних методом термічного аналізу, на осі ординат показують температуру, а на осі абсцис - хімічний склад сплавів (див. рис. 2.2).

Спочатку отримують криві охолодження. У даному випадку їх п'ять: дві криві для чистих компонентів А і В; три - для обраних досліджуваних сплавів 1, 2 і 3. Криві охолодження чистих компонентів мають однаковий вигляд, на них фіксуються горизонтальні ділянки, що відповідають певним температурам кристалізації чистих компонентів. Ці температури - t^A і t^B - переносять на температурні осі діаграми стану, що відповідають чистим компонентам (100 % А і 100 % В). Решта кривих охолодження характеризує сплави.

При кристалізації сплаву 1 спочатку фіксується перегин при температурі а, а потім, при зниженні температури, горизонтальна ділянка Е'. У сплаві 2 спостерігається, як і для чистого компонента, горизонтальна ділянка, що відповідає критичній точці температури Е, а для сплаву 3 - перегин у точці b і «сходінка» при температурі Е''. При цьому температури Е', Е, Е'' збігаються.

Такий хід кривих охолодження сплавів пояснюється типом взаємодії компонентів, що їх утворюють. У розглянутому прикладі фізична природа компонентів А і В така, що вони не взаємодіють між собою у твердому стані, тобто не розчинюються один в одному і не утворюють хімічних сполук між собою, що спостерігається у реальних системах Pb-Sb, Sn-Zn, Pb-Ag тощо.

Для правильного поєднання знайдених критичних точок t^A , а, Е', Е, b, Е'', t^B треба простежити за процесом кристалізації обраних сплавів при повільному охолодженні.

На відміну від чистих компонентів, що кристалізуються при постійній температурі, початок кристалізації сплавів 1 і 3 (рис. 2.2,б) визначають за перегином кривих охолодження. При температурах точок a і b у рідині

**3. Що характеризує
діаграми фазової
рівноваги
компонентів,
необмежено розчинних
у рідкому стані та
нерозчинних у
твердому?**

утворюються кристали A (у сплаві 1) і B (у сплаві 3). Нижче точок a і b рідина стає пересиченою компонентами A і B відповідно, а їх вміст у рідині знижується. Із охолодженням сплаву 1 в інтервалі aE' у рідині зменшується кількість A по лінії aE , і за температури точки E' вона досягає складу точки E . Так само рідина сплаву 3, збіднюючись з охолодженням компонентом B , за складом досягає тієї самої точки E при його охолодженні до E'' . Таким чином, в обох випадках для сплавів 1 і 3 рідина при температурах E' і E'' досягає точки E , стає насиченою компонентами A і B , які одночасно виділяються з рідини за її остаточної кристалізації, утворюючи суміш $A + B$.

Суміш двох фаз, що утворюються з рідини певного складу при одній температурі кристалізації, називають евтектикою, а таке перетворення - евтектичним. Схематично його можна записати так: $P_E \rightarrow A + B$, де P_E - рідина складу, що відповідає точці E . Зрозуміло, що евтектичне перетворення в даній системі відбуватиметься для кожного із сплавів: у сплаві 1 (доевтектичному) при температурі точки E' , а у сплаві 3 (заевтектичному) - при температурі E'' . Щодо евтектичного сплаву 2, то рідина, не виділяючи первинних кристалів A чи B , як це характерно для будь-якого сплаву, відмінного від сплаву 2 за складом, при температурі E відразу кристалізується у вигляді суміші $A + B$, тобто на 100 % складатиметься з евтектики.

4. Як змінюється структура сплавів відповідно до діаграми стану ?

Структура сплавів, яку розглядають за звичайних температур під мікроскопом, є результатом перетворень, що відбуваються в них при підвищених температурах у процесі кристалізації.

Доевтектичний сплав 1 має структуру, що складається з первинних кристалів компоненту А і евтектики А + В; співвідношення їх в об'ємі сплаву дорівнює 50:50 (див. нижче пояснення правила відрізків), тобто половина об'єму сплаву містить кристали А, а половина - евтектику А + В (рис. 2.3,а). Структура евтектичного сплаву 2 на 100 % складається з евтектики А + В (рис. 2.3,б). Структурний склад сплаву 3 вміщує первинні кристали компоненту В і евтектику А + В при їх об'ємному співвідношенні 50:50 (рис. 2.3,в).

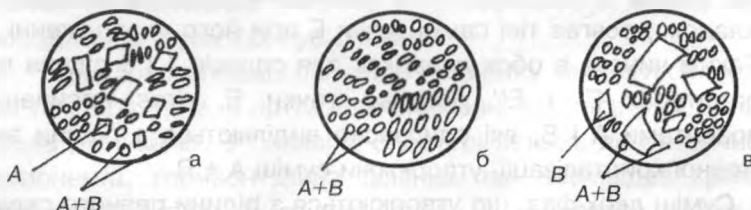


Рис. 2. 3 Схема структур доевтектичного (а), евтектичного (б) і заевтектичного (в) сплавів системи з необмеженою розчинністю компонентів в рідкому стані і нерозчинних в твердому.

5. У чому суть правила відрізків?

Правило відрізків (правило важіля) дозволяє в будь-якій двофазній області

діаграми стану визначити склад і кількість кожної з фаз.

Щоб визначити вміст компонентів у фазах, через точку, що характеризує стан сплаву, проводять горизонтальну лінію (коноду) до перетину з лініями діаграми, що обмежують цю область. Проекції точок перетину коноди з лініями діаграми на ось концентрацій показують склад фаз.

Діаграми стану металевих систем

Наприклад, у сплаві 3 (рис. 2.2, б) при температурі точки с рідина за своїм складом відповідає точці d' на осі абсцис.

Щоб визначити кількісне співвідношення фаз, визначають довжину відрізків коноди від заданої точки діаграми до точок, що позначають склад фаз. Довжини цих відрізків обернено пропорційні кількостям фаз.

Наприклад, у сплаві 3 (рис. 2. 2, б) при температурі точки с кількість рідини пропорційна відрізку se і становить 70 %, а кількість первинних В-кристалів пропорційна відрізку dc , тобто їхня кількість при даній температурі становить 30 %.

У діаграмі стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані можливе існування тільки двох фаз: необмеженого (тобто існуючого за будь-яких концентрацій компонентів) рідкого розчину та необмеженого твердого розчину.

Діаграма (рис. 2.4, а) складається з трьох областей: рідина; рідина + твердий розчин; твердий розчин.

Лінія t^{amt^B} є лінією ліквідусу, а лінія t^{nt^B} - лінією солідусу. Процес кристалізації будь-якого сплаву розглянутої системи за умов повільного охолодження відповідає кривій охолодження (рис. 2. 4, б), схема структуроутворення показана на рис. 2.4, в.

Точка 1 відповідає початку кристалізації. З охолодженням нижче цієї температури в рідині виникають і зростають кристали α -твердого розчину (а не чистого компонента), точка 2 відповідає закінченню кристалізації. Між температурами точок 1 і 2 сплав знаходиться у двофазному стані, з охолодженням сплаву в цьому інтервалі температур змінюється склад рідини і твердого розчину, а також їхнє кількісне співвідношення. Склад рідини змінюється по лінії ліквідусу $1l$, а α -розчину - по лінії солідусу $s2$. При температурі точки а рідина відповідатиме за

6. Які особливості діаграми сплаву сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані?

своїм складом точці b , а кристали твердого розчину - точці c . Об'ємна доля α -кристалів за даної температури дорівнюватиме відрізку ab , а кількість рідини - відрізку ac , тобто $\alpha, \% / \text{рідина}, \% = ab / ac$. Сплав повністю кристалізується при його охолодженні нижче температури точки 2.

За умов повільного (рівноважного) охолодження мікроструктура сплаву полієдрична, рівноважна, як це показано на рис. 2.4,в. Прискорене охолодження призводить до формування дендритної структури.

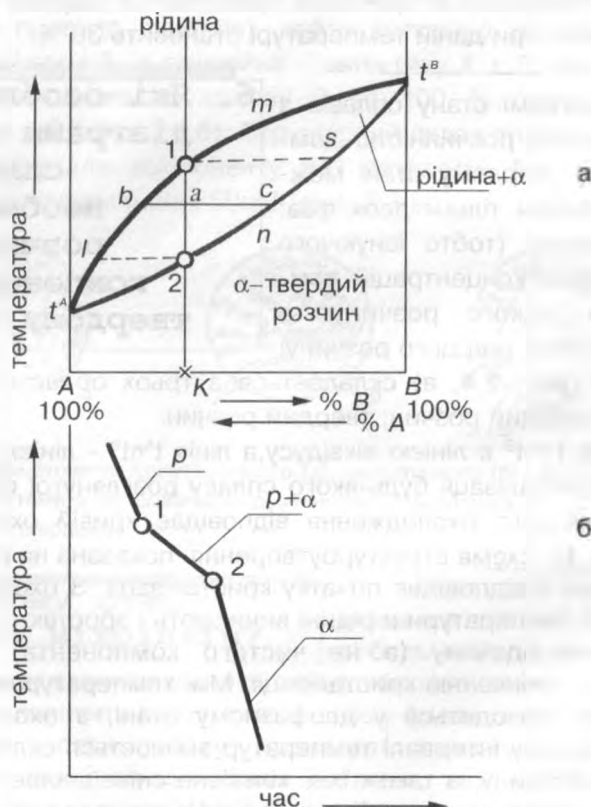


Рис. 2.4 Діаграма стану системи з необмеженою розчинністю компонентів в рідкому і твердому станах (а), крива охолодження сплаву К (б)



Рис. 2. 4,в. Схема утворення структурних складових сплаву К при повільному охолодженні

Якщо умови для утворення необмеженого твердого розчину виконуються не повністю, а компоненти здатні певною

мірою розчинюватися один в одному в твердому стані, тоді за їхньої взаємодії виникають обмежені тверді розчини як заміщення, так і втілення.

Розглянемо діаграму стану, наближену до реальної, у системі Ag-Cu, що наведена на рис. 2.5,а.

Під час кристалізації сплавів такої системи чисті компоненти не виділяються, на базі цих компонентів в рідині можуть утворюватися лише тверді розчини α чи β . Заштриховано межі існування твердих розчинів α (ADF) і β (BCG). При цьому точка D є точкою граничної розчинності міді в сріблі при температурі евтектичного перетворення ($\approx 10\%$ Cu) і подібна їй точка C показує граничну розчинність срібла при цій самій температурі в міді ($\approx 10\%$ Ag). За кімнатної температури, що збігається з віссю складу, гранична розчинність міді в сріблі значно менша і відповідає точці F ($\approx 5\%$ Cu), а точка G відповідає граничній розчинності срібла в міді ($\approx 5\%$ Ag).

7. Чим відрізняються діаграми стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані?

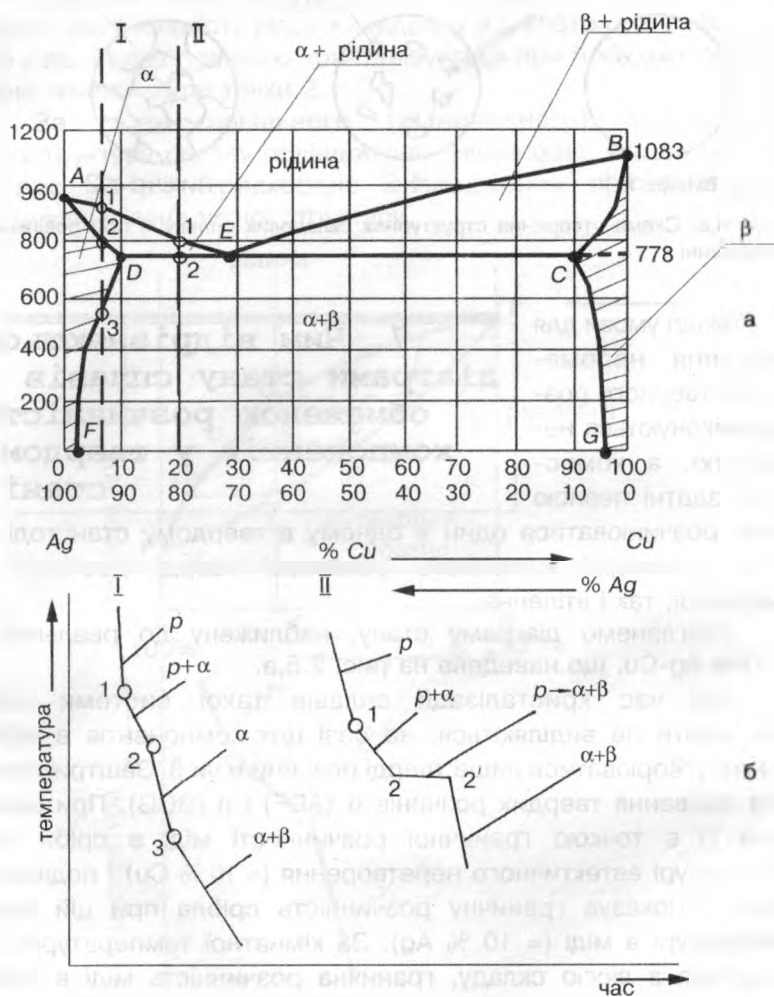


Рис. 2. 5. Діаграма стану системи Ag - Cu (а), криві охолодження типових сплавів (б).

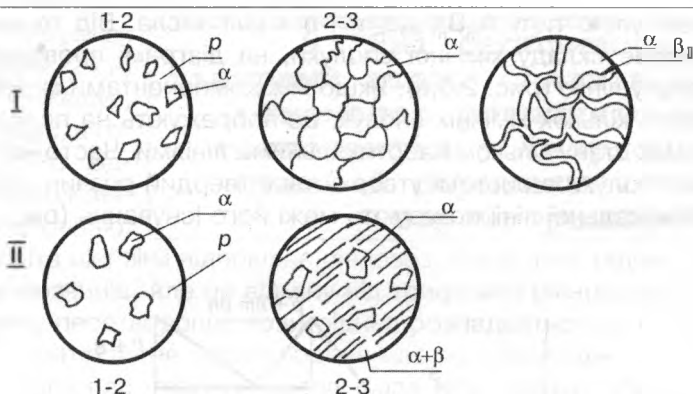


Рис. 2.5,в. Схема утворення структурних складових сплавів 1 і 2 при повільному охолодженні

Таким чином, лінії DF і CG, що з'єднують ці точки, - це лінії граничної розчинності одного компонента в другому, або лінії насичення твердого розчину відповідними компонентами. Лінія AEB - ліквідус, а лінія ADECB - солідус системи. Між ними і гомогенними областями твердих розчинів знаходяться двофазні області: α + рідина, β + рідина, α + β . На рис. 2.5,б представлені криві охолодження типових сплавів, схема утворення структурних складових сплавів при повільному охолодженні на рис. 2.5,в.

До металевих систем, крім рідких та твердих розчинів, відносять також хімічні сполуки. Хімічну сполуку, на відміну від твердого розчину, характеризують сталість складу, просте кратне вагове співвідношення елементів, з яких вона складається; характерні властивості.

Наявність хімічної сполуки у системі позначають на осі складу точкою, що відповідає такій концентрації, за якої вагові співвідношення компонентів мають бути кратними цілим числам. Тобто число атомів компонентів А і В, що утворюють сполуку, має бути цілим, і сполука може бути виражена хімічною

8. Що характеризує діаграми стану сплавів, що утворюють стійку хімічну сполуку?

формулою типу A_mB_n , де m і n - цілі числа. Від точки, що відповідає складу хімічної сполуки, на діаграмі проводять вертикальну лінію (рис. 2.6,а). Якщо між компонентами можливе утворення кількох хімічних сполук, це зображують на подвійних діаграмах стану кількома вертикальними лініями. Часто на базі хімічної сполуки в системі утворюється твердий розчин, тоді замість вертикальної лінії показують межі його існування (рис. 2.6,б).

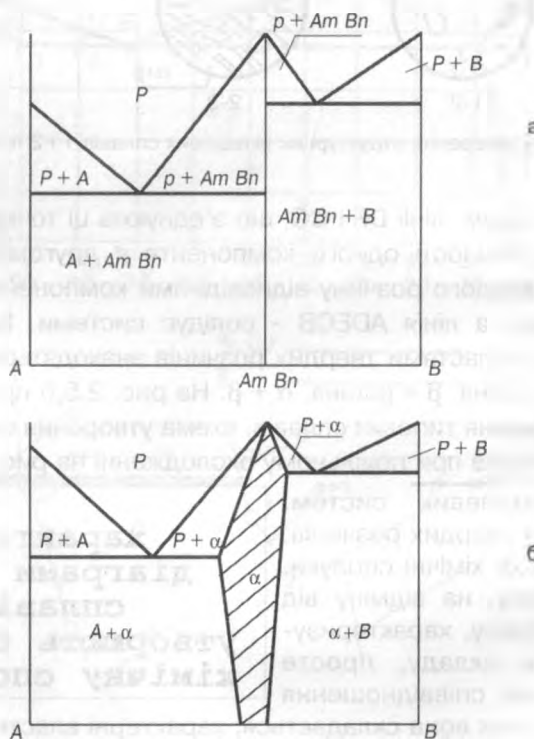


Рис. 2.6. Діаграма стану системи зі стійкою хімічною сполукою (а) і з твердим розчином на базі стійкої хімічної сполуки (б)

На діаграмах такого типу (рис. 2.7,а) лінія ACB - ліквідус, APDB - солідус, а горизонталь CPD відповідає перитектичному перетворенню.

9. Які особливості діаграми стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані й перитектичним перетворенням?

Будь-яка точка цієї лінії відповідає рівновазі трьох фаз: рідини, α і β твердих розчинів. Але на відміну від трифазної рівноваги при евтектичному перетворенні, коли рідина розпадається на суміш двох фаз, перитектичне перетворення має іншу природу.

За такого перетворення нова фаза ніби оточує початкову, звідки і пішла назва «перитектики», що означає «структура оточення». Щоб з'ясувати це, розглянемо кристалізацію сплавів 1 і 2 за умови їхнього повільного охолодження (див. рис. 2.7,а).

Кристалізація сплаву 1 починається при охолодженні нижче температури точки 1, коли в рідині виникають кристали β -розчину складу точки *b*. В міру охолодження рідина змінює свій склад по ліквідусу від точки 1 до точки *C*, кристали β змінюють свій склад по солідусу від точки *b* до точки *D*. Досягнувши перитектичної горизонталі CPD при температурі 2 (але не нижче її), склад рідини відповідатиме точці *C*, а склад β -кристалів - точці *D*. Ці фази взаємодіють між собою з утворенням нової фази - кристалів α -твердого розчину, проміжної між взаємодіючими фазами концентрації:



де: P_C - рідина складу точки *C*,
 β_D - твердий розчин складу точки *D*,
 α_P - твердий α -розчин складу точки *P*.

У такій взаємодії й полягає перитектичне перетворення. Але у цьому випадку одна з взаємодіючих фаз, а саме β -фаза, знаходиться у надлишку, тому що відрізок 2С, який характеризує її кількість в момент перетворення, більший за відрізок CP, що характеризує кількість β -фази, коли вся рідина взаємодіє з усіма β -кристалами.

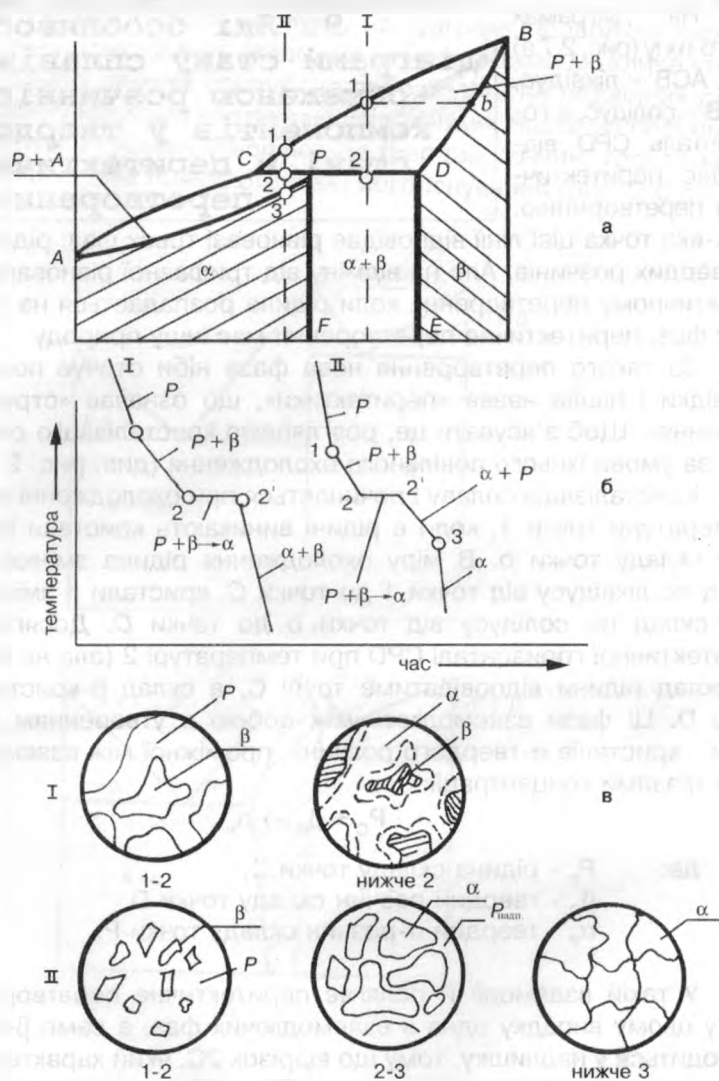


Рис. 2.7. Діаграма фазової рівноваги для випадку обмеженої розчинності компонентів у твердому стані та з перитектичним перетворенням (а), криві охолодження сплавів 1 і 2 (б), схеми структурних перетворень (в)

Діаграми стану металевих систем

Відмінність перебігу кристалізації сплаву II полягає в тому, що при охолодженні сплаву нижче точки 2 за перитектичного перетворення у надлишку буде рідина: відрізок 2D (пропорційний її кількості) більший за відрізок PD (коли вся рідина повинна провзаємодіяти з усіма кристалами). Надлишкова рідина в охолоджуваному сплаві II кристалізується в інтервалі 2-3. Закінчується процес кристалізації нижче точки 3 з утворенням кристалів α -розчину.

У складі сплаву I при температурі 2 приблизно 30 % рідини, решта - β -кристали, тобто $2C/2D = 70/30$ (рис. 2.7,а). Оскільки існує надлишок β -кристалів, після перитектичної взаємодії їхні внутрішні ділянки залишаються незайманими (рис. 2.7,в - штриховані ділянки). Внаслідок перетворення матимемо ці незмінні ділянки β -фази, оточені ділянками α -фази. Штрихові лінії показують розміри кристалічних виділень β -фази до перитектичного перетворення.

Якщо склад сплаву розміщується між точками C і P (сплав II), то за перитектичного перетворення вся β -фаза, що спочатку виділилася, цілком витрачається на утворення α -кристалів, тобто на взаємодію з рідиною. Але частина рідини ще залишається і кристалізується під час подальшого охолодження в інтервалі 2-3. Нижче точки 3 матимемо поліедричну структуру α -твердого розчину (див. рис. 2.7,в).

Нестійкою є така хімічна сполука, яка при нагріванні розпадається передчасно, тобто не досягаючи точки свого природного плавлення. Стійку хімічну сполуку можна нагрівати до розплавлення без розпадання.

**10. Як розуміти
діаграму системи,
що утворює
нестійку хімічну
сполуку?**

У процесі нагрівання нестійка хімічка сполука A_mB_n (рис. 2.8,а) розпадеться (дисоціює) на рідину складу D та кристали B. З охолодженням відбувається зворотна реакція:

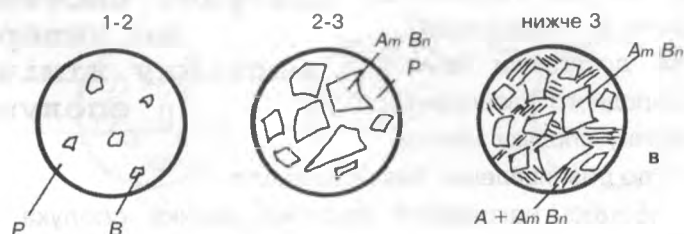
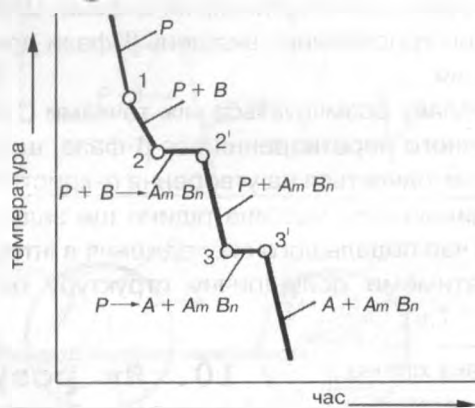
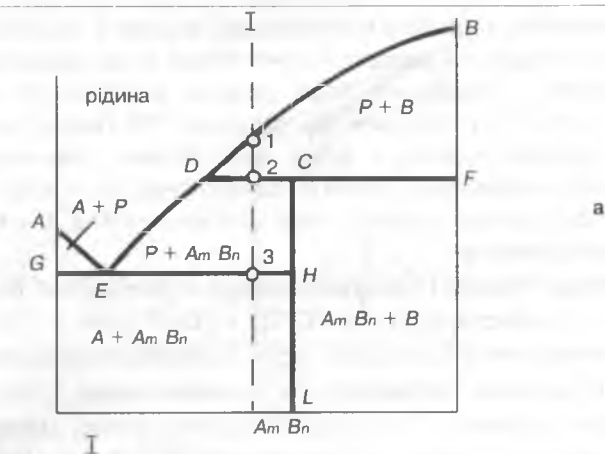


Рис. 2.8. Діаграма стану системи з нестійкою хімічною сполукою (а), крива охолодження сплаву 1 (б), схема структуротворення (в)

Діаграми стану металевих систем

$A + B_n \leftrightarrow P_d + B$, подібна до перитектичної. Але за чисто перитектичного перетворення рідина і твердий розчин певного складу внаслідок взаємодії утворюють новий твердий розчин проміжного складу. У розглянутому прикладі утворюється нестійка хімічна сполука, якій на діаграмі відповідає вертикаль CHL, AEDB - лівідус діаграми, GHCF - солідус.

За рівноважного охолодження сплаву I нижче точки 1 починається кристалізація з виділенням кристалів B. Склад рідини в інтервалі 1-2 змінюється по кривій 1D. Нижче точки 2 утворюється нестійка хімічна сполука згідно перитектичної реакції. Після її завершення в надлишку залишається рідина ($2F > CF$), яка поступово кристалізується з виділенням сполуки A_mB_n доти, доки рідина за своїм складом не досягне точки E. Далі рідина, що залишилася у кількості, пропорційній відрізка 3H, остаточно кристалізується у вигляді евтектики $A + A_mB_n$. Криві охолодження та схема структурних перетворень наведені на рис. 2.8,б і в.

Характерною особливістю діаграм цього типу (рис. 2.9) є наявність поліморфних перетворень компонентів. Низькотемпературна модифікація компонента A, що позначена A_α , існує при температурах від кімнатних до t^A . З подальшим нагріванням відбувається перетворення $A_\alpha \rightarrow A_\beta$, яке має місце також у зворотному напрямі при охолодженні.

Модифікація A_β існує в інтервалі температур від t^A до температури плавлення A. Аналогічна ситуація відбувається з компонентом B, який також має дві поліморфні модифікації: B_α при температурах від кімнатної до t^B і B_β при температурах від t^B до B. Отже, точки t^A і t^B характеризують температури поліморфних перетворень $A_\alpha \leftrightarrow A_\beta$ і $B_\alpha \leftrightarrow B_\beta$. Для сплавів поліморфні перетворення відбуваються по лініях t^AE та Et^B . На базі β -модифікацій компонентів у системі створено β -твердий розчин, лівідус системи ALB, солідус AMB.

11. Що характеризує діаграму стану сплавів з поліморфним перетворенням компонентів?

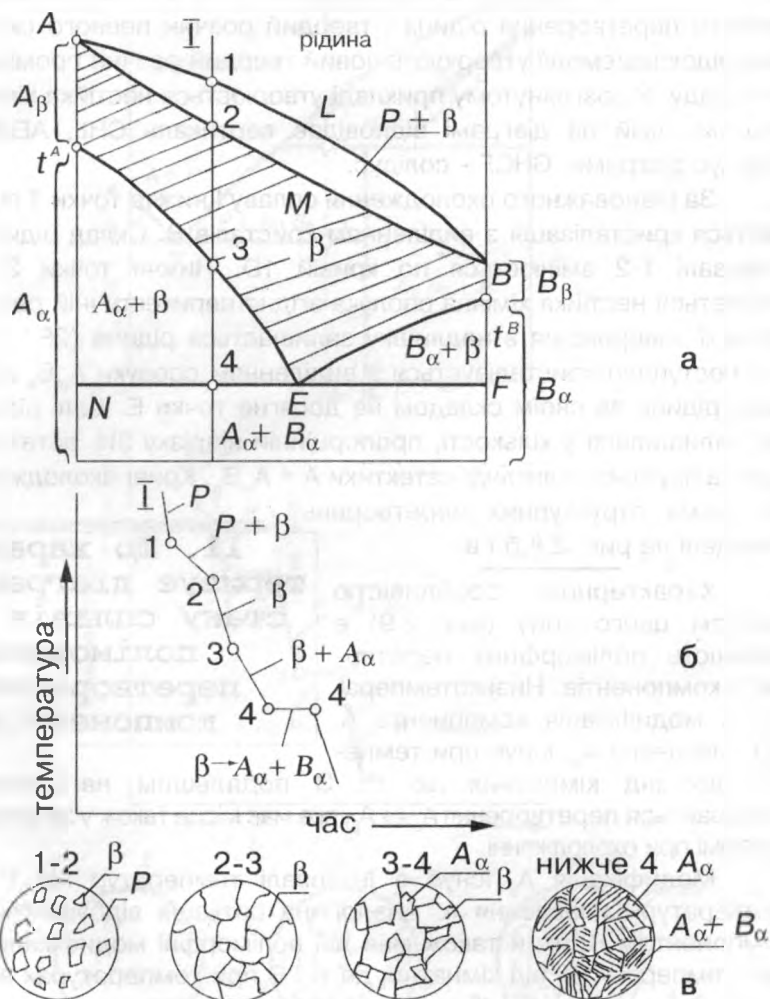


Рис. 2.9. Діаграма стану системи з поліморфізмом компонентів (коли їхні високотемпературні модифікації ізоморфні) та евтектоїдним перетворенням (а), крива охолодження сплаву 1 (б), схема структуротворення (в)

Діаграми стану металевих систем

Горизонталь NEF (рис. 2.9,а) відповідає евтектоїдному перетворенню, зовні схожому на евтектичне. Але на відміну від останнього суміш двох фаз виникає внаслідок розпаду не рідкого, а твердого розчину, у цьому випадку $\beta_E \rightarrow A_\alpha + B_\alpha$. Тобто у будь-якій точці лінії NEF існує рівновага трьох фаз β_E , A_α і B_α , що відповідає горизонтальній площині на кривій охолодження, як і у разі евтектичного і перитектичного перетворень. Суміш двох фаз, що утворилася внаслідок евтектоїдного перетворення, називають евтектоїдом.

Сплав 1 при охолодженні кристалізується в інтервалі 1-2 з утворенням кристалів β -розчину. При подальшому їх охолодженні нижче точки 3 по границях зерен β -фази виникають A_α -кристали. Цей процес відбувається в інтервалі температур 3-4, β -фаза змінює свій склад по лінії 3E і досягає точки E за температури точки 4. За такої температури кількість β -кристалів пропорційна відрізку 4N (тобто їх $\approx 60\%$ об'єму). Охолодження нижче точки 4 призводить до евтектоїдного перетворення β -твердого розчину ($\beta_E \rightarrow A_\alpha + B_\alpha$). Структура після повільного охолодження складається: кристали A_α і евтектоїд $A_\alpha + B_\alpha$ (рис. 2.9,в).

Зв'язок властивостей сплавів

з типом діаграми був досліджений М. С. Курнаковим і показаний у вигляді діаграм «стан-властивості». Визначення такого зв'язку є важливим для створення нових сплавів з прогнозованими властивостями. На рис. 2.10 показано зміни властивостей (твердість -1, електропровідність -2) відповідно типу діаграм стану двокомпонентних систем.

Системи, що мають необмежену розчинність компонентів у рідкому стані та утворюють механічні суміші у твердому стані, характеризуються зміною властивостей за прямолінійним законом (рис. 2.10,а). Тому створити сплав, механічні й електричні властивості якого б перевищували властивості вихідних компонентів, неможливо.

12. Який зв'язок існує між типом діаграми і властивостями сплавів?

При утворенні необмежених твердих розчинів (рис. 2.10,б) властивості сплавів змінюються нерівномірно за криволінійним законом. Тому твердість і електропровідність сплавів можуть значно відрізнятись від властивостей вихідних компонентів. Наприклад, сплави з необмеженою розчинністю компонентів за рівної їхньої кількості мають максимальний електроопір.

У сплавах з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані властивості змінюються відповідно приналежності сплаву до тієї чи іншої частини діаграми (рис. 2. 10, в).

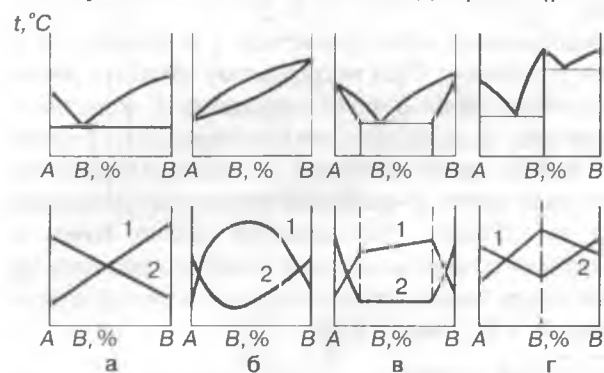


Рис. 2.10. Діаграми стан-властивостей сплавів (за М. С. Курнаковим): 1 - твердість, 2 - електропровідність. Діаграми стану - лише наближена схема, що не завжди підтверджується експериментом. У ній не враховується форма і розмір кристалів, їхнє взаємне розташування, температура та інші фактори, що значно впливають на властивості сплавів.

Таким чином, показано, що між хімічним складом сплавів та їхніми властивостями існує певний зв'язок. М. С. Курнаковим встановлено закономірність зміни таких властивостей, як твердість, електроопір, щільність для різних типів діаграм стану сплавів.

О. М. Бочвар на прикладі розподілу дефектів усадки у вигляді концентрованої раковини і пористості, а також зміни тріщиностійкості засвідчив, що існує залежність між складом сплаву і його технологічними властивостями.

Подальшим розвитком цих ідей стали роботи О. М. Магницького щодо встановлення зв'язку кінетики кристалізації сплавів різного складу з типом діаграми стану.

При утворенні в системі хімічних сполук (рис. 2.10,г) властивості сплавів змінюються стрибкоподібно. Точка переламу на діаграмі відповідає утворенню хімічної сполуки.

Описані залежності зміни вла-

стивостей спла-

вів відповідно до

діаграм стану -

лише наближена

схема, що не завжди

підтверджується

експериментом.

У ній не враховується

форма і розмір

кристалів, їхнє

взаємне розташування,

температура та інші

фактори, що значно

впливають на

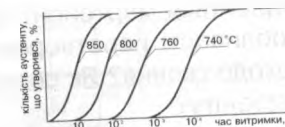
властивості сплавів.

Залізо- вуглецеві сплави

3

РОЗДІЛ 3

залізо-вуглець
рівновага
ферит
аустеніт
графіт
цементит
бейніт
мартенсит
розпад аустеніту
бал зерна



Питання, висвітлені у розділі 3

1. У чому особливості діаграми стану залізовуглецевих сплавів? Чим відрізняються діаграми Fe-Fe₃C і Fe-C?
2. Що означають основні лінії і особливі точки на діаграмі залізовуглецевих сплавів Fe-Fe₃C?
3. Які фази і структури утворюються у залізовуглецевих сплавах (сталях, чавунах)?
4. Що таке критичні точки, температури?
5. Як впливають легуючі елементи на діаграму стану Fe-Fe₃C?
6. Як класифікують залізовуглецеві сплави?
7. Як і за якими ознаками класифікують сталі?
8. Як здійснюється маркування сталей?
9. Як розрізняють структури вуглецевих сталей при мікроскопічних дослідженнях?
10. Як і за якими ознаками класифікують чавуни?
11. Яка система маркування прийнята для чавунів?
12. Які фазові перетворення відбуваються в сталі?
13. Які перетворення відбуваються при охолодженні сталі з аустенітного стану?
14. Які особливості має ізотермічне перетворення аустеніту при охолодженні сталі? Як розуміти діаграму ізотермічного розпаду аустеніту?
15. Які особливості має процес перлітного перетворення?
16. Чим особливе бейнітне (проміжне) перетворення?
17. Які особливості мартенситного перетворення?
18. Як утворюється мартенсит при гартуванні сталі?
19. Які особливості перетворення аустеніту за умов безперервного охолодження? Як розуміти термкінетичні діаграми розпаду аустеніту?
20. Які перетворення відбуваються при нагріванні сталі?
21. Які особливості утворення аустеніту при нагріванні сталі? Як розуміти діаграми ізотермічного перетворення аустеніту?
22. Зерно в сталі. Які фактори впливають на розміри зерна?

Діаграма стану залізо-вуглецевих сплавів - це графічне зображення фазового стану сплавів системи залізо-вуглець залежно від вмісту вуглецю і температури за умов повільного (рівноважного) нагрівання або охолодження. Наведена діаграма (рис. 3.1)

1. У чому особливості діаграми стану залізо-вуглецевих сплавів? Чим відрізняються діаграми $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ і $\text{Fe}-\text{C}$?

дає основні уявлення про будову сталей ($< 2\% \text{ C}$) і чавунів ($> 2\% \text{ C}$), є основою у виборі температури при проведенні термічної обробки. Діаграма подається у спрощеному вигляді для інтервалу концентрацій вуглецю від 0 до 6,67 %, тобто до утворення хімічної сполуки карбіду заліза Fe_3C (цементиту), яка поводить себе як самостійний компонент.

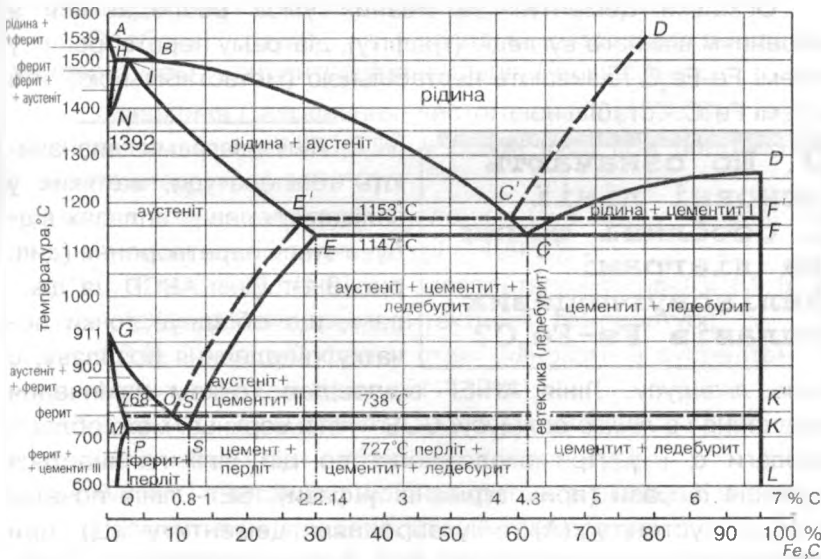


Рис. 3.1. Діаграма фазової рівноваги залізо-вуглецевих сплавів: суцільні лінії - цементитна (метастабільна) система; штрихові лінії - графітна (стабільна) система

Ця частина діаграми має практичне значення, оскільки сплави з більшим вмістом вуглецю дуже крихкі. Зазначимо, що вуглець, внаслідок процесів, що відбуваються при охолодженні залізовуглецевих сплавів, може не тільки хімічно взаємодіяти з залізом, утворюючи Fe_3C , а й виділятися у вигляді графіту. Тому розрізняють дві діаграми стану: залізо-цементит ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$) і залізо-графіт ($\text{Fe}-\text{C}$). Перша діаграма на рис. 3.1 показана суцільними лініями, друга - штриховими. Всі лінії системи $\text{Fe}-\text{C}$ розміщуються на діаграмі вище ліній системи $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ (евтектичне і евтектоїдне перетворення відбувається за вищих температур 1153 і 738°C відповідно). Точки C, E, S зміщені вліво (C - 4,26 %, E - 2,11 %, S - 0,7 %). Лінія ECF відповідає температурі утворення графітної евтектики (аустеніт + графіт), лінія PSK - евтектоїдна (ферит + графіт). По лінії ES виділяється вторинний графіт.

Оскільки цементит за певних умов розпадається з утворенням вільного вуглецю (графіту), діаграму перетворення у системі $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ називають нестабільною (метастабільною), а в системі $\text{Fe}-\text{C}$ - стабільною.

2. Що означають основні лінії і особливі точки на діаграмі залізовуглецевих сплавів $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$?

Лінії діаграми визначають температури, за яких у залізовуглецевих сплавах відбуваються перетворення (див. рис. 3.1). Лінія ABCD на діаграмі, що об'єднує точки початку тверднення розплаву, є лінією ліквідусу. Лінія ANIEF відповідає точкам закінчення тверднення і є лінією солідусу. GOS - лінія верхньої межі області рівноваги $\alpha + \gamma$. При охолодженні по цій лінії починається виділення α -фази (при нагріванні γ -фази). SE - лінія початку розпаду аустеніту (A) з утворенням цементиту (C) при охолодженні (критичні точки A_{r_m}) і при нагріванні - лінія одержання однорідного аустеніту (критичні точки A_{c_m}). PQ - лінія початку виділення цементиту (третинного) при охолодженні й

Залізовуглецеві сплави

закінчення розчинення третинного цементиту при нагріванні. Однофазні області аустеніту, фериту і δ -фериту обмежені лініями NIESG, GPQ, AHN. Деякі лінії діаграми відображають такі температурні й концентраційні умови, за яких у рівновазі знаходяться три фази. Так, лінія HIB за перитектичної температури (1499°C) характеризується наявністю трьох фаз: δ -фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Сплави на лінії ECF, що відповідає евтектичній температурі (1147°C), складаються з рідини, аустеніту і цементиту. Сплави на лінії PSK, що відповідає евтектоїдній температурі (727°C), складаються з аустеніту, фериту і цементиту. За температур 768°C (лінія MO) і 210°C спостерігається магнітне перетворення фериту і цементиту. Нижче 768°C ферит має феромагнітні характеристики, вище цієї температури він парамагнітний. Аналогічні процеси відбуваються в цементиті при нагріванні його вище 210°C - він переходить з феромагнітного в парамагнітний стан. Температури 768°C і 210°C є точками Кюрі відповідно фериту і цементиту.

Особливі точки на діаграмі відповідають певним температурам і концентраціям вуглецю (% , мас.):

- A - плавлення (тверднення) чистого заліза (1539°C);
- B - вміст вуглецю (10,5 %) у рідкій фазі при перитектичній температурі (-1499°C);
- H - гранична кількість вуглецю (0,1 %) у δ -фазі при перитектичній температурі (1499°C);
- I - 0,16 % C в аустеніті, що знаходиться в рівновазі з δ -фазою і рідкою фазою при перитектичній температурі;
- C - 4,3 % C у рідкій фазі в стані рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147°C);
- E - 2,14 % C в аустеніті, що знаходиться в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі;
- S - 0,8 % C в аустеніті, що знаходиться в рівновазі з феритом і цементитом при евтектоїдній температурі;
- P - 0,02 % C гранична кількість вуглецю, розчиненого у фериті, що знаходиться в рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі.

3. Які фази і структури утворюються у залізовуглецевих сплавах (сталях, чавунах) ?

Основними фазами метастабільної системи залізо-вуглець є аустеніт, ферит і цементит.

Аустеніт, А - це твердий розчин вуглецю в γ -залізі. Він має кубічну гра-нецентровану кристалічну

гратку, періоди якої залежать від температури і присутності інших елементів. При 20°C період гратки γ -заліза дорівнює 3,56 Å. Зі зростанням температури розчинність вуглецю в γ -залізі підвищується і досягає максимуму (2,14 %) для нелегованого аустеніту за евтектичної температури 1147°C. Аустеніт пластичний, немагнітний, має твердість 170-300 НВ.

Деякі елементи (Mn, Ni, Cu тощо) зміщують точки $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення у бік нижчих температур. Тому сталі з підвищеним вмістом таких елементів мають структуру аустеніту і за кімнатної температури (рис. 3.2,а).

Ферит, Ф - твердий розчин невеликої кількості вуглецю та інших елементів у α -залізі. У ширшому розумінні це - твердий розчин на основі заліза з об'ємноцентрованою кубічною граткою. Максимальна розчинність за 727°C наближається до 0,02 % С і зменшується практично до нуля зі зниженням температури, період гратки фериту дорівнює 2,86 Å при 20°C. 0 % С). Ферит магнітний за температури нижче 768°C, має твердість 80-100 НВ.

Цементит, Ц - хімічна сполука вуглецю і заліза (Fe_3C). Він містить 6,68 % С, має орторомбічну кристалічну гратку з дванадцятьма атомами заліза і чотирма атомами вуглецю. магнітний за температури нижче 210°C. Твердість 700 НВ.

У сплавах з вмістом вуглецю > 4,3 % і в легованих сталях з підвищеним вмістом вуглецю та легуючих елементів у місцях підвищеної неоднорідності випадає первинний цементит (безпосередньо з розплаву). Вторинний цементит виділяється з аустеніту вздовж лінії ES, третинний - з фериту вздовж лінії PQ.

Структурні складові залізовуглецевих сплавів (рис. 3.2 - 3.7) утворюються з описаних трьох основних фаз.

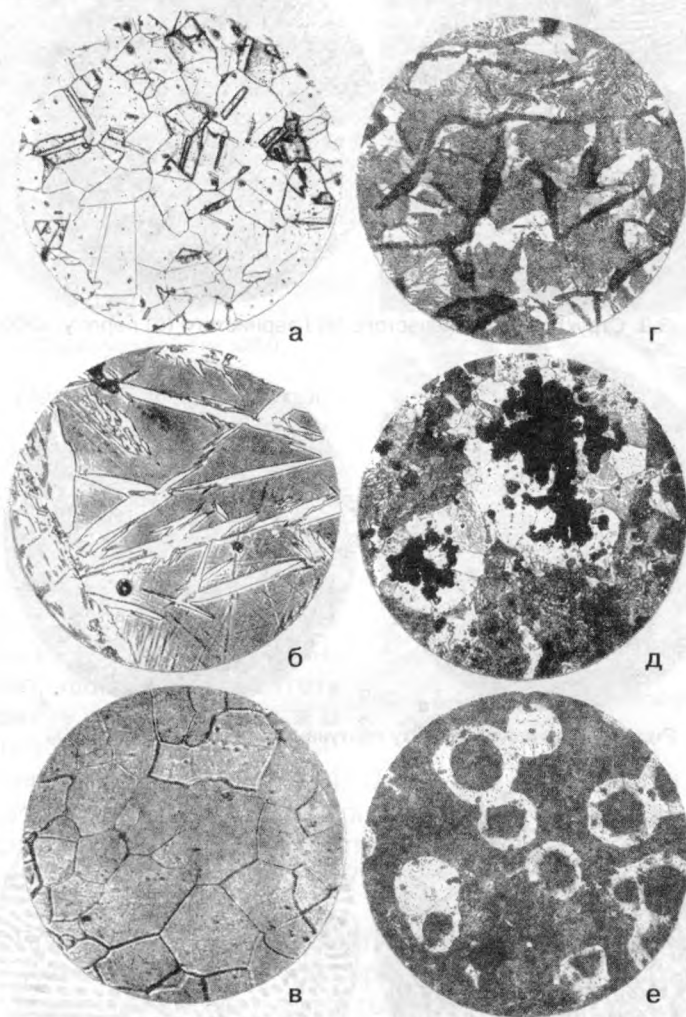


Рис. 3.2. Мікроструктури залізовуглецевих сплавів: а - поліедри аустеніту, $\times 100$; б - аустеніт з голками мартенситу, $\times 500$; в - ферит, $\times 200$; г - пластини графіту в чавуні, $\times 100$; д - графіт пластівчастий, $\times 200$; е - графіт кулястий, $\times 200$

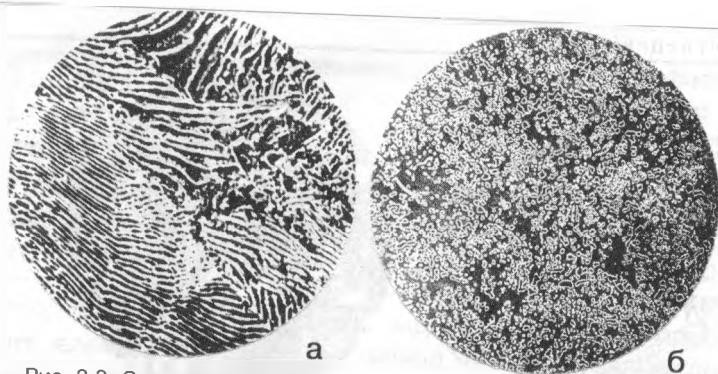


Рис. 3.3. Структура пластинчастого (а) і зернистого (б) перліту, х200

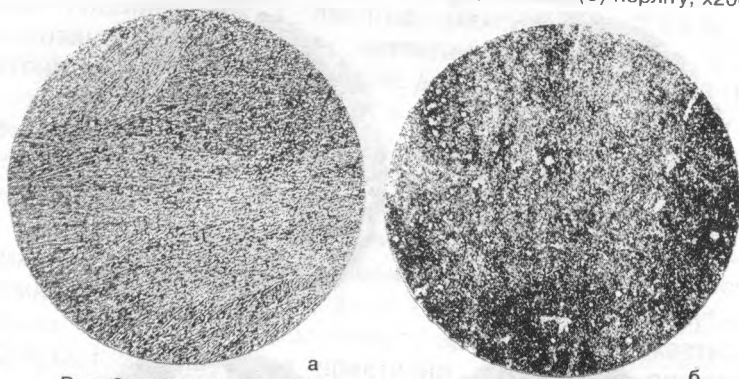


Рис. 3.4. Структури сорбіту гартування (а) і відпуску (б), х200

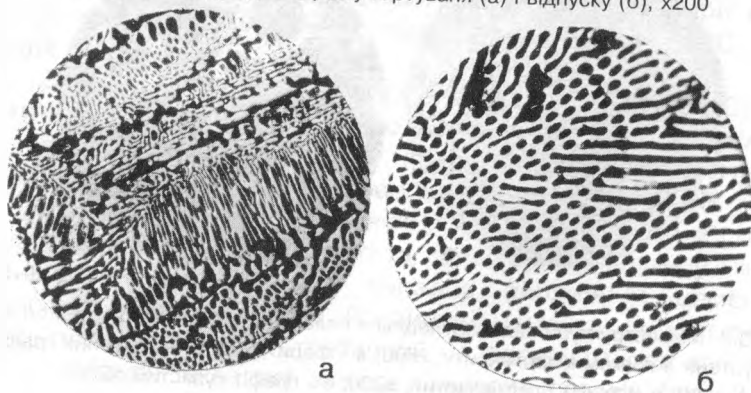


Рис. 3.5. Структура ледебуриту, х350

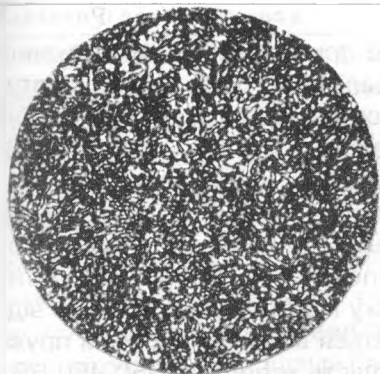


Рис. 3.6. Структура бейніту, х350

Перліт, П; сорбіт (троостит) - це механічна суміш (евтектоїд) цементиту і фериту, що утворюється при повному розпаді аустеніту. Свою назву перліт отримав за специфічний блиск на полірованому шліфі, що нагадує блиск перлини. Перліт з пластинчастою формою цементиту називають пластинчастим, а із зернистою формою цементиту - зернистим (див. рис. 3.3). Зернистий перліт отримують у процесі розпаду мартенситу при відпуску або в інших випадках (сфероїдизуючий відпал). Температура рівноважного перетворення аустеніту на перліт - 727°C . Перліт магнітний, має твердість 160-200 НВ.

При підвищеній швидкості охолодження з аустенітного стану утворюються структури сорбіту (див. рис. 3.4) і трооститу. Вони відрізняються від перліту тоншою будовою (високою дисперсністю) феритно-цементитної суміші. Структури зернистого трооститу і сорбіту утворюються внаслідок розпаду мартенситу і коагуляції часток цементиту. Механічні властивості перліту, сорбіту і трооститу визначаються формою і розмірами складових



Рис. 3.7. Структури мартенситу: а - х350; б - х500

часток. Сорбіт утворюється за умов прискореного охолодження під час розпаду аустеніту в інтервалі 600-700°C (сорбіт гартування) або під час відпуску мартенситу (сорбіт відпуску). Сорбіт магнітний, його твердість (для сталі з 0,8 % C) - 250-350 НВ. Сталь зі структурою сорбіту має високий поріг пружності, достатній рівень ударної в'язкості й низьку схильність до крихкого руйнування. Троостит утворюється за прискореного охолодження аустеніту в інтервалі температур 400-600°C (троостит гартування), а також під час відпуску мартенситу (троостит відпуску). Троостит відпуску відзначається високим порогом пружності, міцності й витривалості. Твердість трооститу 350-450 НВ.

Бейніт, Б - механічна суміш перенасиченого вуглецем α -твердого розчину (маловуглецевого мартенситу) і карбідів (див. рис. 3.6). Утворюється внаслідок розпаду аустеніту за умов інтенсивного охолодження (при 450-200°C). Розрізняють *верхній бейніт* (частки карбідів розміщені між пластинками α -фази), що утворюється у верхній зоні проміжного перетворення, і *нижній бейніт*, що утворюється при температурах, близьких до M_n . У структурі нижнього бейніту α -фаза має голчасту будову, а дисперсні карбіди розміщуються всередині пластин α -фази. Нижній бейніт характеризується вищими міцністю, пластичністю, в'язкістю порівняно із структурами гартування на мартенсит після їх відпуску. Твердість верхнього бейніту - 35-40 HRC, нижнього - 40-50 HRC.

Мартенсит, М - перенасичений твердий розчин вуглецю та інших елементів в α -залізі (див. рис. 3.7), утворюється з аустеніту внаслідок бездифузійного перетворення (перебудова кристалічної ґратки α - заліза без зміни вмісту вуглецю) у процесі швидкого охолодження при температурі нижче 200-250°C. Вміст вуглецю в мартенситі дорівнює вмісту вуглецю у вихідному аустеніті. Максимальна твердість мартенситу (60-65 HRC) залежить від значного вмісту вуглецю в кристалічній ґратці. Мартенсит має кубічну об'ємноцентровану кристалічну ґратку. Для мартенситу характерна тетрагональність, тобто співвідношення осей у ґратці мартенситу $c / a > 1$. Тетрагональність мартенситу - наслідок вмісту вуглецю. Мартенсит феромагнітний, відрізняється низькою пластичністю і в'язкістю. У структурі загартованої сталі завжди, крім мартенситу, присутній залишковий аустеніт.

Ледебурит, Л - евтектична структура (рис. 3.5), що на момент утворення складається з суміші аустеніту і цементиту. Утворюється за температури 1147°C (див. рис. 3.1 - лінія ECF) і вмісту вуглецю в рідині 4,3 %. За наявності Cr, W, Mo та інших елементів ледебурит може утворюватися і при меншому вмісті вуглецю. Під час подальшого охолодження (нижче A_1) він розпадається з утворенням ферито-цементитної суміші. Характеризується високою твердістю (700 HB) і крихкістю.

Графіт, Г - різновид вуглецю, має чорний колір, спостерігається на мікрошліфі без протравлювання (див. рис. 3.2, г, д, е). Має гексагональну кристалічну ґратку, низькі твердість і міцність, щільність - $2,2 \text{ г/см}^3$. Графіт - структурна складова чавунів. У сірому чавуні він має вигляд пластин різної форми і розмірів, у ковкому - форму пластивців, а у високоміцному - кулясту форму. У сталях графіт зустрічається лише за умови високого вмісту кремнію і вуглецю. Його присутність кваліфікують як дефект - чорний злам. Лише в інструментальній графітізованій сталі передбачають виділення графіту.

Д. К. Чернов у 1868 р. показав, що під час нагрівання і охолодження заліза і сталі до певних температур, названих критичними, відбуваються

4. Що таке критичні точки, температури?

закономірні зміни структури і, відповідно, властивостей залізо-вуглецевих сплавів. Розташування температурних точок перетворення залежить від вмісту вуглецю. Уявлення про існування при певних температурах відповідних структур, стабільних за даних умов (мають мінімум вільної енергії), взяті за основу побудови діаграми стану Fe - C, яку використовують у теорії та практиці термічної обробки сталі й чавуну (див. рис. 3.1).

Критичні точки позначають літерою А (початкова літера від фр. *arreter* - зупинятися). Нижня критична точка A_1 знаходиться на лінії PSK (727°C) діаграми залізо - вуглець і відповідає перетворенню аустеніту на перліт. Точка A_2 відповідає лінії MO

(768°C) магнітного перетворення фериту; A_3 (лінія GOS) відповідає початку виділення або завершенню розчинення фериту в доєвтектоїдних сталях; A_4 (лінія NJ) - перетворення $Fe_8 \leftrightarrow Fe_7$.

Температури точок перетворення при нагріванні вищі, ніж при охолодженні. Ця різниця визначається так званим гістерезисом. Він тим більший, чим вища швидкість нагрівання чи охолодження. Для того, щоб відрізнити критичні точки під час нагрівання і охолодження, їх позначають: літерою *c* (від фр. *chauffer* - нагрівати) - Ac_1 , Ac_3 ; літерою *r* (від фр. *refroidir* - охолоджувати) - Ar_1 , Ar_3 . За дуже малих швидкостей нагрівання і охолодження різниця температур зникає і точки Ac і Ar зливаються в одну рівноважну точку.

Таким чином, критичну точку перетворення аустеніту на перліт позначають Ar_1 , а перліту на аустеніт - Ac_1 ; початок виділення фериту з аустеніту позначають Ar_3 , а закінчення розчинення фериту в аустеніті - Ac_3 . Початок виділення вторинного цементиту з аустеніту позначають Ar_m , а закінчення розчинення вторинного цементиту в аустеніті - Ac_m . Температури початку і закінчення мартенситного перетворення позначають відповідно M_n і M_k .

Відкриття критичних точок у залізі та сталі Д. К. Черновим стало основою теорії і науково обгрунтованої технології термічної обробки залізовуглецевих сплавів.

5. Як впливають легуючі елементи на діаграму стану Fe - Fe₃C?

Легуючі елементи вводять до складу сталі з метою надати їй спеціальних властивостей. Залежно від впливу на інтервал температур, існування алотропних модифікацій заліза (δ , γ , α) і на розташування критичних точок, легуючі елементи поділяють на дві групи.

До першої відносять елементи, що знижують точку A_3 і підвищують A_4 і тим самим розширюють область існування

Залізовуглецеві сплави

аустеніту (Ni, Mn, Cu). За таких умов точка A_{c3} може знаходитися нижче кімнатної температури і γ -стан може бути стабільним від кімнатної температури до температури плавлення. Такі залізовуглецеві сплави називають *аустенітними*.

До другої групи належать елементи, що підвищують точку A_1 і знижують A_4 , звужуючи (замикаючи) область існування аустеніту (Si, Al, Cr, W, Mo, V, Ti, Nb). При підвищенні вмісту цих елементів, переважно Cr, Si, і при низькому вмісті вуглецю область існування фериту розширюється. При всіх температурах залишається стабільним α -стан. Такі залізовуглецеві сплави називають *феритними*.

Вуглець посилює вплив елементів першої групи і гальмує вплив елементів другої. Легуючі елементи викликають переміщення точки A_1 , а також знижують, за винятком Co, розчинність вуглецю в аустеніті й зміщують розташування точки S вліво (див. рис. 3.1). У разі присутності в сталі кількох легуючих елементів їхній вплив, хоча й не адитивний, значно підвищується.

Залізовуглецеві сплави - сталі й чавуни - найважливіші матеріали сучасної техніки.

6. Як класифікують залізовуглецеві сплави?

Сталь - це сплав, в якому вміст вуглецю становить менше 2 %, *чавуном* називають сплав з вмістом вуглецю понад 2 %.

Останнім часом поширюється застосування сплавів на основі заліза з дуже низьким вмістом вуглецю, цей елемент вважається навіть шкідливою домішкою. Проте такі сплави також називають *сталями*. Щоб уникнути термінологічної плутанини, «сплави» з вмістом заліза понад 50 % вважають чавунами або *сталями* і не рекомендують іменувати сплавами. Відповідно сплавами рекомендують називати сполуки, що містять менше 50 % заліза. З наукової точки зору це не зовсім правильно, проте з технічної досить чітко обгрунтовано.

7. Як і за якими ознаками класифікують сталі?

Сталі класифікують за хімічним складом, за структурою в рівноважному стані та після охолодження на повітрі, за якістю і призначенням.

За *хімічним складом* (за наявністю в сталі тих чи інших легуючих елементів) розрізняють вуглецеві та леговані сталі.

Сталь, що не містить легуючих елементів (крім вуглецю) називають *вуглецевою*. Вуглецева сталь з вмістом вуглецю до 0,25 % називається *низьковуглецевою*, 0,25-0,6 % - *середньовуглецевою*, 0,6-2 % - *високовуглецевою*.

Серед *легованих* сталей залежно від вмісту основного легуючого елемента розрізняють хромисті, нікелеві, хромонікелеві, марганцеві, хромокремнієвомарганцеві тощо.

Із сталей з високим вмістом легуючих елементів, що розширюють γ -область на діаграмі стану, утворюється клас аустенітних сталей; із сталей з високим вмістом елементів, що звужують γ -область і низьким вмістом вуглецю (розширює γ -область) утворюється клас феритних сталей.

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

За структурою після охолодження зразків (діаметр 25 мм) на повітрі розрізняють три основних класи сталей: *перлітний* - сталі цього класу характеризуються відносно низьким вмістом легуючих елементів або їх відсутністю; *мартенситний* - містять дещо більшу кількість легуючих елементів; *аустенітний* - характеризуються високим вмістом легуючих елементів.

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

За призначенням сталі можуть об'єднуватися у кілька груп.

Конструкційні - використовують для виготовлення деталей машин і зазвичай піддають термічній обробці. Конструкційні сталі поділяють на сталі для цементації; сталі поліпшувани (гартування і високий відпуск); сталі будівельні (низьколеговані) - призначені для термічної обробки у споживача.

Інструментальні - сталі, що використовують для виготовлення різального, штампувального і вимірювального інструменту. Інструментальні сталі умовно поділяють на вуглецеві, леговані, штампові, швидкорізальні.

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

Для позначення різних сталей розроблено державну систему маркування. Позначення сталі складається з невеликої кількості цифр і літер, що вказують на приблизний склад сталі. Кожен з легуючих елементів позначають відповідною літерою: Н - нікель; Х - хром; Г - марганець; С - кремній; В - вольфрам; М - молібден; Ф - ванадій; К - кобальт; Д - мідь; Ю - алюміній; Б - ніобій; Р - бор; Т - титан; Ц - цирконій; А - азот; П - фосфор; Ч - рідкоземельні метали.

8. Як здійснюється маркування сталей?

Конструкційні якісні вуглецеві сталі маркують цифрами 08, 10, 15, 20 ..., 85, що вказують на середній вміст вуглецю у сотих долях процента, а у високовуглецевих інструментальних сталях - в десятих долях процента. 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 % - 2 тощо.

Літера А у кінці позначення сталі вказує на обмежений вміст сірки і фосфору ($S < 0,03 \%$; $P < 0,03 \%$), а також на те, що дотримано всіх технологічних вимог металургійного виробництва високоякісної сталі. Літера А всередині марочного позначення вказує на наявність азоту, спеціально введенного в сталь.

Для скорочення кількості знаків у позначенні марки сталі іноді відступають від загальноприйнятої системи, особливо для складнолегованих сталей, і опускають цифри, що означають вміст вуглецю або іншого легуючого елемента (інструментальні сталі з вмістом вуглецю понад 1%).

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

9. Як розрізняють структури вуглецевих сталей при мікроскопічних дослідженнях?

Умови утворення тих чи інших фаз і структур можна визначити за діаграмою стану, розглядаючи процеси, що відбуваються у сталі при охолодженні.

Основними структурними складовими сталі є ферит, цементит, аустеніт, перліт (див. рис. 3.2 -

3.4). При мікроскопічному спостереженні ферит має вигляд світлих зерен з темними границями; цементит - світлих пластин (голок) або зерен різної величини; перліт, залежно від форми часток, може мати пластинчасту або зернисту будову. При невеликих збільшеннях (у 200-300 разів) зерна пластинчастого перліту мають сірий колір, при більших - вони смугасті.

Структура доєвтектоїдних сталей (до $0,8 \%$ С) відповідно до діаграми стану (рис. 3.8) складається або з фериту (при вмісті $C < 0,006 \%$), або з фериту й третинного цементиту (якщо вміст вуглецю збільшується до $0,02 \%$), або з фериту і перліту (при вмісті вуглецю від $0,02$ до $0,8 \%$).

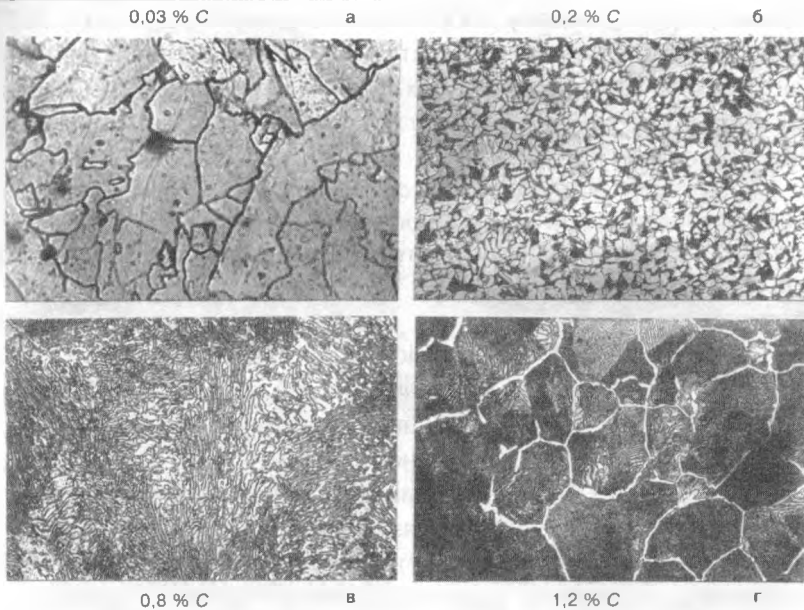


Рис. 3.8. Структури сталі з різним вмістом вуглецю: а - ферит (x200); б - ферит + перліт (x100); в - перліт (x400); г - перліт + цементит

При спостереженні за допомогою світлового мікроскопу структури сталей з вмістом вуглецю менше 0,02 % помітні лише світлі дендритні зерна. Третинного цементиту в цих сталях мало і розміщується він по границях феритних зерен (чорні вкраплення). Такі сталі називають також технічно чистим залізом.

Сталі з вмістом вуглецю понад 0,02 % мають структуру, що складається зі світлих (ферит) і темних (перліт) зерен. Кількісні співвідношення між ними залежить від вмісту вуглецю в сталі. Зі збільшенням вмісту вуглецю кількість фериту зменшується, а перліту - зростає.

Структура евтектоїдної сталі (0,8 % C) складається з перліту (див. рис. 3.8,в). При уважному розгляданні перліту можна розрізнити світлі прошарки фериту і темні смуги цементиту.

Шарувату будову перліту добре помітно при збільшеннях у 500 і більше разів. Різний колір фериту і цементиту пояснюється різним ступенем протравлення цих фаз і умовами освітлення шліфа. Зернистий перліт має вигляд світлих дрібних зерен на феритному тлі.

Структура заевтектоїдних сталей (понад 0,8 % C) складається з зерен перліту і вторинного цементиту, що розміщується по границях перлітних зерен, утворюючи своєрідну світлу сітку (див. рис. 3.8,г).

10. Як і за якими ознаками класифікують чавуни?

Чавун - залізовуглецевий сплав з вмістом вуглецю понад 2,14 %. У чавуні присутні також кремній, марганець, сірка, фосфор. Залежно від хімічного складу, умов кристалізації та швидкості охолодження вуглець у

чавуні може бути в хімічно зв'язаному (цементит Fe_3C) або у вільному стані (графіт). За умов швидкого охолодження вуглець виділяється переважно у вигляді цементиту, а за повільного охолодження - у вигляді графіту. Графіт зумовлює сіре забарвлення на зламі - такий чавун називають сірим. Чавун, у якому вуглець знаходиться у вигляді цементиту (злам має специфічний білий колір) і перліту, називають білим.

Білий чавун має високу твердість, крихкий, практично не обробляється різальними інструментами. За структурою, згідно діаграми залізо-цементит, білі чавуни поділяють на доевтектичні, евтектичні й заевтектичні. До складу всіх білих чавунів входить ледебурит (евтектичне поєднання перліту і цементиту) з вмістом вуглецю 4,3 % C, який має високі показники крихкості й твердості (див. рис. 3.5).

Структура доевтектичного білого чавуну (2,14-4,3 % C) складається з перліту, ледебуриту й вторинного (рис. 3.9,а) цементиту. Евтектичний білий чавун (4,3 % C) формується з однієї евтектики - ледебуриту (рис. 3.9,б). Структура заевтектичного білого чавуну (4,3-6,67 % C) складається з ледебуриту і первинного цементиту (рис. 3.9,в,г).

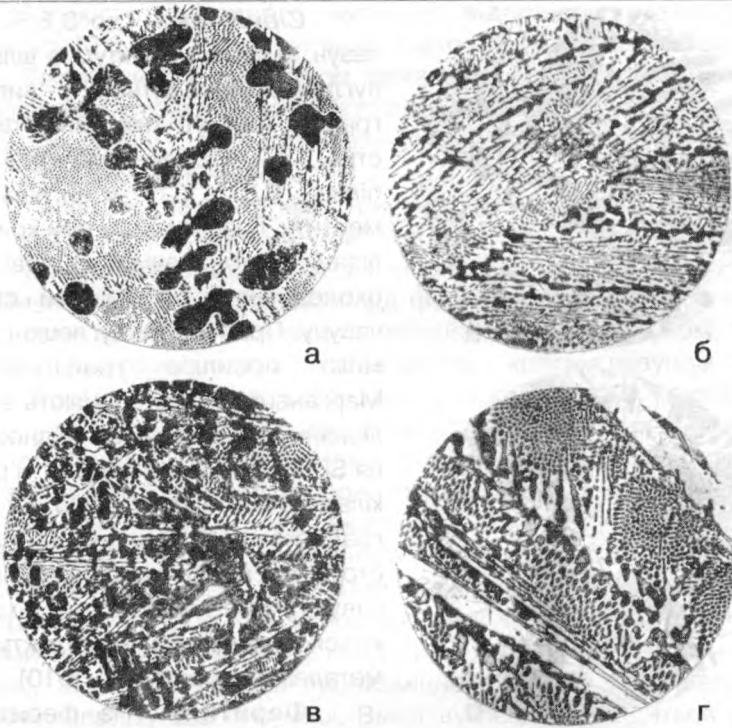


Рис. 3.9. Структури доєвтектичного (а); евтектичного (б) і заєвтектичного (в, г) білого чавуну

Через високу твердість ($HB > 450$) і крихкість білі чавуни у машинобудуванні майже не використовуються. Заєвтектичний і евтектичний чавуни переплавляють, а доєвтектичний за допомогою спеціальної термічної обробки переробляють на ковкий чавун.

Використовують так званий *відбілений чавун* - сірий з тонким шаром білого на поверхні (10-30 мм). Відбілювання є наслідком швидкого охолодження поверхні під час кристалізації чавуна у металевій формі (кокіль). Відбілений чавун має високі поверхневу твердість і стійкість проти спрацювання. Використовується для виготовлення прокатних валків, коліс, виробів для залізничного транспорту тощо.



Рис. 3.10. Структури сірого чавуну з феритною (а); феритно-перлітною (б); перлітною (в) основами, $\times 200$

Сірий чавун (до 3,8 % C) - чавун, у якому структурно вільний вуглець знаходиться у вигляді графіту (вигнуті пластини, пелюстки), а у зв'язаному стані (не більше 0,8 % C) - у вигляді цементиту. Графітизацію при кристалізації забезпечують повільне охолодження та хімічний склад чавуну. Присутність вуглецю і кремнію посилює графітизацію. Марганець і сірка сприяють відбілюванню. Змінюючи співвідношення Si та Mn, можна одержати різну кількість вільного вуглецю. Ступінь графітизації визначає характер структури металевої основи сірого чавуну. Розглянемо, як поділяються сірі чавуни за *структурою металевої основи* (рис. 3.10).

Феритний - з феритною структурою основи і пластин графіту. Увесь вуглець присутній у формі графіту, який має вигляд темних смуг, зерна фериту світлі з темними краями.

Ферито-перлітний з структурою металевої основи ферит + перліт і графітом у вигляді пластин. Кількість зв'язаного у Fe_3C вуглецю менша 0,8 %.

Перлітний - структура чавуну складається з перліту і вкраплень графіту у вигляді прожи-

Залізовуглецеві сплави

лок. Кількість зв'язаного вуглецю відповідає евтектоїдній структурі (0,8 %), решта вуглецю знаходиться у формі графіта.

Таким чином, структури металевої основи сірих чавунів відповідають структурі доевтектоїдної, евтектоїдної сталі та заліза, а специфічні властивості чавунів визначає кількість і морфологія графітових вкраплень.

Графіт у чавунах має три основні морфологічні форми (рис. 3.11): пластинчастий у вигляді прожилок, пластин, пелюсток; кулястий і пластівчастий з компактною, рівновісною, але не сферичною формою. Залежно від форми графіту чавун з пластинчастим графітом називають звичайним сірим чавуном, з кулястим - високоміцним, з пластівчастим - ковким чавуном.

Форму графітових вкраплень у сірому чавуні можна змінити, якщо при кристалізації до його складу додати невелику кількість спеціальних елементів - модифікаторів. Так, якщо увести в розплавлений чавун перед розливкою 0,5 % феросиліцію або алюмінію, графіт подрібнюється і набуває кулястої форми. Це підвищує механічні властивості чавуну ($\sigma_B = 400$ МПа). Такий чавун називають модифікованим. Застосування таких модифікаторів, як Mg або Се зумовлює виділення графіту кулястої форми та підвищує міцність і пластичність чавуну (високоміцний чавун). Металева основа високоміцного чавуну складається з фериту, перліту або їх суміші. Вміст вуглецю знаходиться у межах 3,0-3,6 %. Високоміцний чавун за механічними властивостями переважає сірий і ковкий, застосовується для виготовлення відповідальних деталей (колінчастих валів, зубчастих коліс тощо).

Ковкий чавун отримують з білого чавуну тривалим спеціальним відпалом - «томленням». Нестійкий цементит розпадається на залізо і вуглець. Графіт, що утворюється, набуває потрібної пластівчастої форми. Залежно від режиму відпалу металічна основа може бути феритною або перлітною. Вміст вуглецю у ковких чавунах - 2,4-3,4 %. Твердість феритного ковкого чавуну 160 HB, перлітного - 270 HB. Відсутність ливарних напружень, що знімаються при відпалі, сприятлива форма та ізолюваність графіту зумовлюють високі механічні властивості ковкого чавуну.

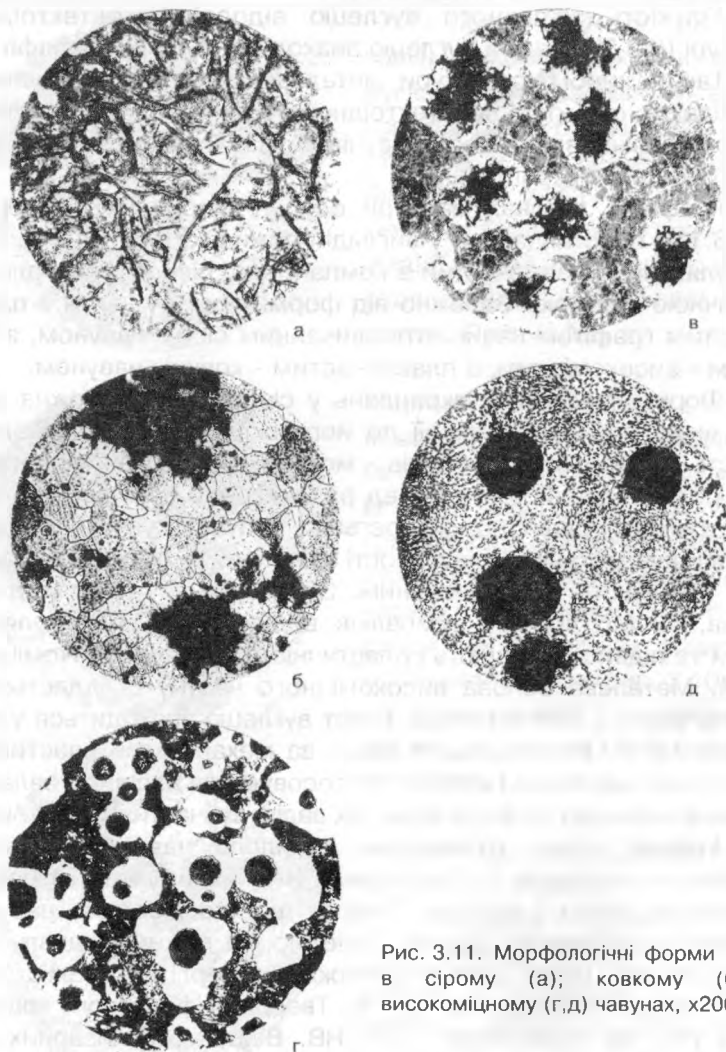


Рис. 3.11. Морфологічні форми графіту в сірому (а); ковкому (б,в) і високоміцному (г,д) чавунах, $\times 200$

Виливки з нього використовують для роботи при ударних навантаженнях, а також для виготовлення тонкостінних деталей.

Маркування чавунів здійснюють поєднанням відповідних літер і цифрових позначень. Літери означають: Ч - чавун; С - сірий; К - ковкий; В - високоміцний. Цифрами позначають механічні властивості.

У марках сірого чавуну дві цифри після літер вказують на поріг міцності при розтягуванні. Наприклад, СЧ 18 - сірий чавун з порогом міцності при розтягуванні 180 МПа.

Високоміцні та ковкі чавуни маркують літерами відповідно ВЧ і КЧ. Перші дві цифри означають поріг міцності при розтягуванні, а другі дві - відносне видовження в ковкому чавуні. Наприклад, ВЧ 60 - високоміцний чавун з $\sigma_b = 600$ МПа; КЧ 35-10 - ковкий чавун з $\sigma_b = 350$ МПа, $\delta = 10$ %.

11. Яка система маркування прийнята для чавунів?

Фазові перетворення в сталі можуть відбуватися при зміні агрегатного стану або у твердому стані. Перший тип фазових перетворень визначає процес кристалізації сталі, другий - зумовлює формування кінцевої структури сталі та її властивостей.

12. Які фазові перетворення відбуваються в сталі?

Фазові перетворення в сталі у твердому стані поділяються на три групи.

Алотропічне перетворення відбувається при зміні кристалічної модифікації. Наприклад, у залізі при певній температурі об'ємноцентрована кубічна (ОЦК) кристалічна ґратка перетворюється на гранецентровану кубічну (ГЦК).

Евтектоїдний розпад - розпад твердого розчину, за якого утворюється механічна суміш двох хімічно і кристалографічно різних фаз. Так, результатом евтектоїдного розпаду аустеніту сталі є поєднання фериту і цементиту. Характерним для цього процесу є те, що він відбувається за постійної температури.

Розпад пересичених твердих розчинів - виділення частинок другої фази внаслідок зменшення розчинності при зниженні температури. Цей вид перетворення, на відміну від алотропного, відбувається без зміни кристалічної ґратки основного металу (наприклад, виділення вторинного цементиту з аустеніту або третинного цементиту з фериту при зниженні температури).

Перетворення починаються зазвичай в невеликих об'ємах з утворення стійких зародків нової фази. Далі відбувається зростання зародків нової фази за рахунок вихідної (результат дифузії або без її участі). Для утворення стійких зародків нової фази, здатних до подальшого зростання, потрібен певний час (інкубаційний період).

Рівноважні фази, що відповідають діаграмі рівноваги, утворюються поступово. Спочатку можуть утворюватися перехідні або метастабільні фази, які потім переходять у рівноважні (стабільні) фази.

13. Які перетворення відбуваються при охолодженні сталі з аустенітного стану?

Аустенітний стан є вихідним при здійсненні більшості операцій термічної обробки сталі. Характер перетворень сталі при охолодженні залежить від швидкості охолодження (ступеня переохолодження).

Ступінь переохолодження зумовлює механізм і кінетику перетворення і, як наслідок, структуру та властивості сталі. Перехід сталі з аустенітного стану при повільному охолодженні пов'язується з перетворенням аустеніту за відносно невисоких ступенів переохолодження. Воно має місце при термічних операціях відпалювання і нормалізації. Визначити вплив переохолодження в процесі безперервного охолодження складно. Тому перетворення аустеніту у зв'язку з різним ступенем переохолодження вивчають в ізотермічних умовах, використовуючи діаграми ізотермічного розпаду аустеніту. Такі умови створюють швидким переохолодженням аустеніту до різних температур

Залізовуглецеві сплави

нижче точки A_1 . Витримуючи аустеніт за таких температур, визначають початок і кінець його розпаду. Для цього у більшості випадків використовують магнітометричний або дилатометричний методи. Поєднавши лініями точки, що відповідають початку і завершенню перетворення за різних температур, одержують основні лінії на діаграмі ізотермічного розпаду аустеніту (рис. 3.12).

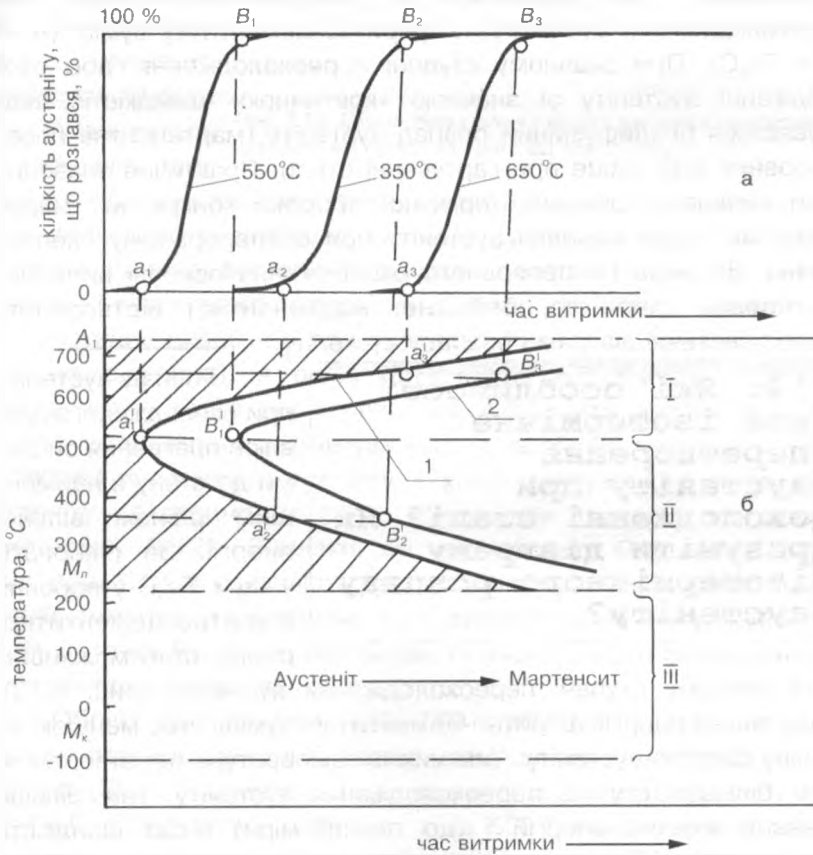


Рис. 3.12. Діаграма ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту сталі з 0,8 % С та схема її побудови: а - кінетичні криві; б - С-подібні криві; 1 - початок дифузійного розпаду аустеніту; 2 - кінець дифузійного розпаду; M_n і M_s - температури початку і кінця мартенситного перетворення

Переохолодження вуглецевої сталі до температур в інтервалі A_1 - 550°C з наступним ізотермічним витриманням призводить до перлітного перетворення аустеніту, а ізотермічне переохолодження в інтервалі від 550°C до $250\text{--}300^\circ\text{C}$ - до бейнітного перетворення. Перлітне і бейнітне перетворення вуглецевої сталі зводяться до дифузійного розпаду переохолодженого аустеніту на феритно-цементитну суміш ($A \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). При значному ступені переохолодження, або охолодженні аустеніту зі значною «критичною» швидкістю, відбувається бездифузійний розпад аустеніту (мартенситне перетворення має місце при гартуванні сталі). Практичне значення при виявленні режимів термічної обробки конкретних марок сталі має перетворення аустеніту при безперервному охолодженні. За умов безперервного охолодження основні види перетворень (перлітне, бейнітне, мартенситне) відтворюють термокінетичні діаграми розпаду аустеніту.

14. Які особливості має ізотермічне перетворення аустеніту при охолодженні сталі? Як розуміти діаграму ізотермічного розпаду аустеніту?

Розпад аустеніту при охолодженні зумовлює прагнення системи до стану з найменшим рівнем вільної енергії. За рівноваги $\gamma - \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ утворення феритно-цементитної суміші стає можливим

при певному ступені переохолодження аустеніту (рис. 3.13), коли вільна енергія феритно-цементитної суміші стає меншою за вільну енергію аустеніту. Чим нижча температура перетворення, тим більший ступінь переохолодження аустеніту, тим більша різниця вільних енергій і (до певної міри) вища швидкість перетворення. При цьому відбувається перетворення γ -заліза на α -залізо і виділення вуглецю з аустеніту з утворенням цементиту. Фази, що утворюються, значно відрізняються від вихідної за вмістом вуглецю: у фериті майже немає вуглецю, а в

Залізовуглецеві сплави

цементиті його вміст дорівнює 6,67 %. Тому перетворення $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ супроводжується дифузією, перерозподілом вуглецю. Швидкість дифузії різко зменшується зі зниженням тем-

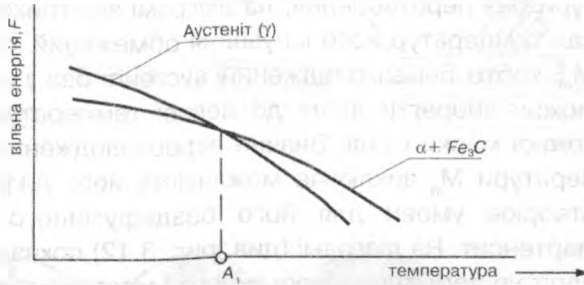


Рис. 3.13. Схема зміни вільної енергії аустеніту і феритно-цементитної суміші залежно від температури

ператури (зі зростанням ступеня переохолодження) і тому процес дифузійного розпаду аустеніту уповільнюється. Проте сумарна дія двох факторів - термодинамічного (різниця вільних енергій) і кінетичного (швидкість дифузії) призводить спочатку до зростання швидкості перетворення (при збільшенні ступеня переохолодження), а після досягнення максимуму - до її уповільнення. Якщо послідовно переохолодити зразки певної сталі з ізотермічним витримуванням їх за різних температур та зафіксувати моменти початку і кінця дифузійного розпаду аустеніту, то отримаємо серію кривих для побудови діаграми (див. рис. 3.12). Відрізки по осі абсцис OA_1 , OA_2 , OA_3 (див. рис. 3.12,а) означають час до початку перетворення при певній температурі ізотермічного витримування (інкубаційний період); точки B_1 , B_2 , B_3 відповідають часу повного завершення дифузійного розпаду аустеніту.

Обрані температури (650, 550 і 350°C) і відповідно три ступеня переохолодження, засвідчують, що при малих (650°C) і значних (350°C) переохолодженнях аустеніту перетворення $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ відбувається повільно, а за 550°C перетворення має максимальну швидкість. При побудові діаграми з'єднують точки початку (A_1 , A_2 , A_3) і кінця (B_1 , B_2 , B_3) дифузійного розпаду аустеніту і отримують так звані С-подібні криві. Область переохолодженого аустеніту, що зберігається певний час за даної темпера-

тури без перетворення, на діаграмі заштриховано. Проте інтервал температур його існування обмежений температурою точки M_n , тобто переохолоджений аустеніт без дифузійного розпаду можна зберегти лише до певної температури, конкретної для кожної марки сталі. Значне переохолодження аустеніту до температури M_n виключає можливість його дифузійного розпаду і створює умови для його бездифузійного перетворення на мартенсит. На діаграмі (див. рис. 3.12) показані три області температур перлітного, проміжного і мартенситного перетворень.

15. Які особливості має процес перлітного перетворення?

Перетворення $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ у вуглецевій сталі відбувається в інтервалі температур переохолодження аустеніту $A_1 - 550^\circ C$. Основними особливостями перлітного перетворення є такі.

Перетворення відбувається за дифузійним механізмом і має кристалізаційний характер;

На краях зерен аустеніту утворюються зародки цементиту, прилеглий аустеніт збіднюється вуглецем. Це сприяє виникненню зародків фериту у спосіб поліморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Внаслідок дифузійного перерозподілу компонентів відбувається кооперативне зростання двофазних $\alpha - Fe_3C$ колоній. Схему зародження і росту перлітної колонії наведено на рис. 3.14.

Основною характеристикою перлітного перетворення є відстань між пластинами цементиту. Вона залежить від ступеня переохолодження (обернено пропорційно) і при кожному певному ступені переохолодження відповідає максимальній швидкості росту феритно-цементитної колонії.

Механічні властивості перліту залежать не тільки від відстані між пластинами цементиту, а й від розмірів перлітних колоній, зумовлених величиною аустенітних зерен (рис. 3.14,б).

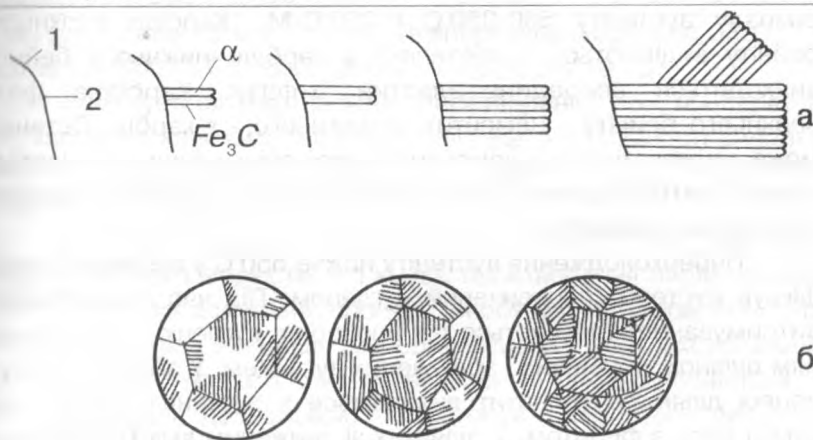


Рис. 3.14. Схеми зародження і росту перлітної колонії (а) та утворення перлітного зерна (б); 1 - границя зерна аустеніту; 2 - зародок цементиту

Продуктами перлітного перетворення є перліт, сорбіт, троостит - пластинчасті феритно-цементитні суміші. Вони відрізняються між собою відстанню між пластинами цементиту (перліт $\approx 0,5-1,0$ мкм; сорбіт $\approx 0,3$ мкм; троостит $\approx 0,03$ мкм). Дисперсність феритно-цементитної суміші зростає зі зниженням температури розпаду переохолодженого аустеніту, тобто структура трооститу дрібніша за структуру сорбіту, а сорбіта - дрібніша за структуру перліту.

У вуглецевих сталях нижче вигину С-подібної кривої (див. рис. 3.12,б) в інтервалі низчих температур розпаду переохолодженого аустеніту $550^{\circ}\text{C}-M_n$ відбувається так зване *бейнітне перетворення*,

**16. Чим
особливе
бейнітне
(проміжне)
перетворення?**

що є проміжним між перлітним і мартенситним. Внаслідок цього утворюється суміш фериту і карбіду заліза, що має назву бейніт (див. рис. 3.6). Карбід заліза в бейніті дуже дисперсний і не має пластинчастої будови. Розрізняють *верхній* і *нижній* бейніт, які утворюються відповідно в інтервалах температур

розпаду аустеніту $550-350^{\circ}\text{C}$ і $350^{\circ}\text{C}-M_n$. Карбіди верхнього бейніту виділяються з аустеніту, а карбіди нижнього бейніту знаходяться всередині пластин α -фази. Карбідна фаза верхнього бейніту - цементит, а нижнього - ϵ -карбід. Останній може змінюватися на цементит у разі збільшення часу ізотермічного витримування. Верхній бейніт містить крупніші карбіди і має меншу твердість.

Переохолодження аустеніту нижче 550°C у вуглецевій сталі фіксує аустеніт, пересичений вуглецем. Під час ізотермічного витримування відбувається перерозподіл вуглецю з формуванням ділянок, збіднених і збагачених вуглецем. У збагачених вуглецем ділянках цементит виділяється з аустеніту, утворюючи суміш його з феритом. У ділянках зі зниженим вмістом вуглецю аустеніт перетворюється на ферит, з якого виділяється цементит.

На ізотермічних діаграмах вуглецевих сталей бейнітне перетворення не відокремлене від перлітного. На діаграмах сталей, легуваних хромом, вольфрамом, молібденом під С-подібними кривими знаходяться С-криві бейнітного перетворення.

17. Які особливості мартенситного перетворення?

Мартенситне перетворення відбувається бездифузійним способом, оскільки аустеніт до моменту $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення переохолоджується до такого стану, що дифузія вуглецю практично виключена. Внаслідок швидкісного охолодження від температур, вищих A_1 , вуглець, залишаючись розчиненим у твердому розчині, викликає викривлення його кристалічної ґратки. Утворюється пересичений твердий розчин вуглецю в α -тетрагональному залізі - *мартенсит*.

Перетворення аустеніту на мартенсит при охолодженні починається з певної, чітко визначеної для кожної сталі температури - *температури початку мартенситного перетворення* (M_n) (див. рис. 3.12,б). Вона залежить не від швидкості охолодження, а значною мірою від вмісту вуглецю і легуючих елементів у сталі.

Залізовуглецеві сплави

Так, для сталей з 0,4 % С M_n температура дорівнює 380°C, з 0,6 % С - 300°C, 0,8 % С - 230°C, з 1,0 % С - 190°C.

Закінчується мартенситне перетворення при температурі M_k , що мало залежить від вмісту вуглецю і у більшості випадків нижче кімнатної. Для доевтектоїдної і заевтектоїдної сталей вона знаходиться на рівні 100°C.

При температурі M_n , коли утворюються перші кристали мартенситу (зі швидкістю ≈ 1 км/с), перетворення лише починається. Для продовження процесу необхідне безперервне охолодження сталі в інтервалі температур M_n - M_k . Якщо охолодження припинити, то мартенситне перетворення також зупиняється. У структурі сталі, де основою є мартенсит, перебуває невелика кількість аустеніту (залишкового). Чим нижче знаходиться точка M_n , тим більша кількість аустеніту залишається після гартування. Загартована сталь з 0,7 % С містить близько 5-7 % залишкового аустеніту, а сталь з 1,0 % С - 10-15 %.

Розглядаючи гранецентровану кубічну ґратку (ГЦК) аустеніту (вихідний стан при гартуванні сталі), можна виділити тетрагональну об'ємноцентровану (ОЦК) комірку заліза (рис. 3.15). Вона

18. Як утворюється мартенсит при гартуванні сталі?

відповідає будові мартенситу - пересиченого розчину вуглецю в α -залізі. Це стає можливим за умов, коли атоми вуглецю при гартуванні з аустенітного стану не змінюють свої позиції. Вони знаходяться в октаедричних порах ґратки аустеніту.

Внаслідок $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення вуглець знаходиться в тих самих позиціях і в тій самій кількості, що і в аустеніті. Це призводить до змін кристалічної ґратки α -заліза, вона стає тетрагональною з певним відношенням періодів ґратки $c/a > 1$ (див. рис. 3.15). Ступінь тетрагональності при викривленні ґратки α -заліза (мартенситу) пропорційна вмісту в ньому вуглецю. З цим пов'язане зростання твердості мартенситу і сталі після гартування залежно від вмісту в ній вуглецю (рис. 3.16).

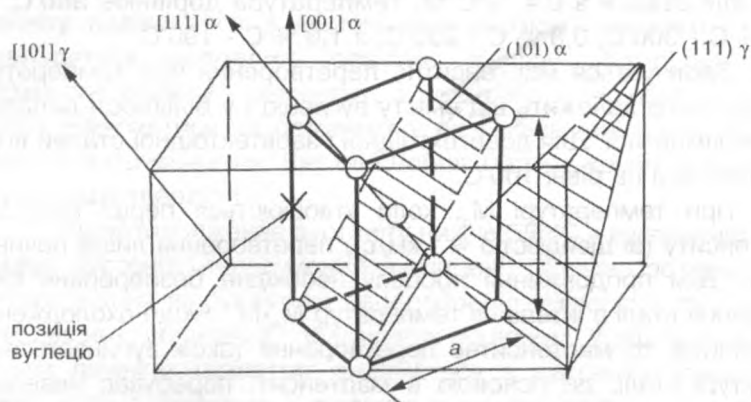


Рис. 3.15. Схема утворення тетрагональної комірки мартенситу на базі ґратки аустеніту

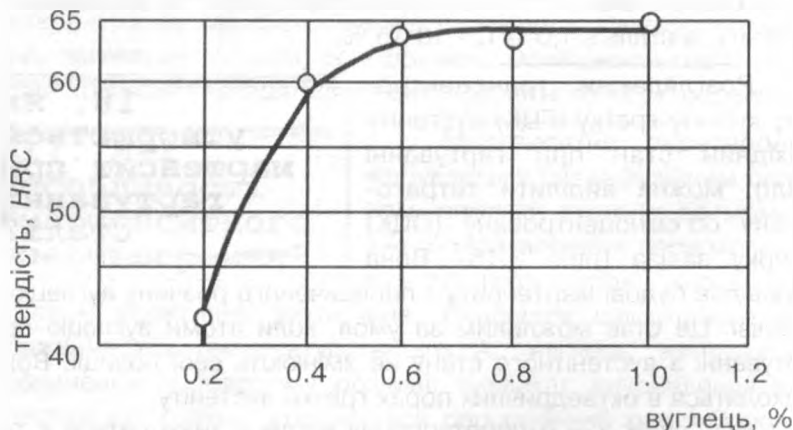


Рис. 3.16. Залежність твердості мартенситу від вмісту вуглецю

За даними електронно-мікроскопічних досліджень, кристали мартенситу складаються з фрагментів розміром 0,1-1,0 мкм з кутом розорієнтування 5-10°. Фрагменти, зокрема, формуються з комірок розміром 100-200 Å та кутом розорієнтування 1-2°. Межі комірок армовані дислокаціями з густиною 10^{11} - 10^{12} см⁻².

Більшість видів термічної обробки пов'язана з безперервним охолодженням сталі. Крім того, за умов виробництва неможливо забезпечити по всьому об'є-

19. Які особливості перетворення аустеніту за умов безперервного охолодження? Як розуміти термокінетичні діаграми розпаду аустеніту?

му виробу, що підлягає термічній обробці, високу швидкість охолодження до температури ізотермічного витримування. Тому в практиці термічної обробки неабиякого значення набувають термокінетичні діаграми розпаду аустеніту. Їх будують у тих самих координатах, що й ізотермічні. На діаграми наносять точки початку і кінця перетворення при різних швидкостях охолодження, а також кінцеву структуру і твердість при певній швидкості охолодження. Приклад такої діаграми для сталі 40 після її нагріву (аустенітизації) до 880°C наведено на рис. 3.17. Швидкості охолодження - V_1 , V_2 , V_3 - характеризують розпад аустеніту в інтервалі температур перлітного перетворення. Цифри на кривих показують співвідношення (60:40, 50:50, 20:80) між феритом (перша цифра) і перлітом (друга цифра) - продуктами перетворення аустеніту доєвтектоїдної сталі у перлітній області.

Цифри 180, 220, 270 показують твердість в одиницях Брінелля, що відповідає певним швидкостям охолодження. Швидкості охолодження V_4 і V_5 відповідають перетворенню аустеніту на бейніт. Він утворюється у кількостях 5 і 20% відповідно, решта структури - ферито-цементитна суміш типу трооститу. Сталь з такою структурою має твердість відповідно 500 і 530 НВ. При швидкості охолодження V_6 кількість бейніту не перевищує 2 %, решта структури - мартенсит, твердість сталі 550 НВ. Користуючись термокінетичною діаграмою, можна визначити для конкретної сталі мінімальну швидкість, що забезпечує утворення лише мартенситної структури. Її називають верхньою критичною швидкістю охолодження (див. штрихова лінія на рис. 3.17).

Цифри на діаграмі характеризують долю структури, що утворилася, у відсотках.

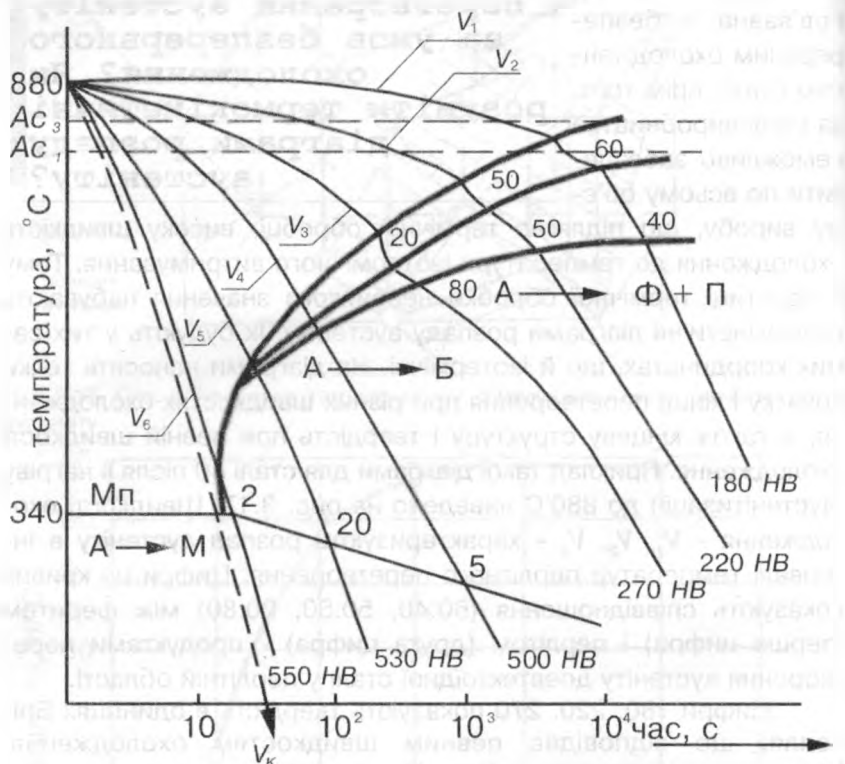


Рис. 3.17. Схема побудови термокінетичної діаграми для сталі з 0,4 % С при температурі нагріву 880°C

Подібно до діаграм ізотермічного розпаду аустеніту, положення і форма термокінетичних діаграм залежить від температури аустенітизації, розміру зерна (чим вища температура і більше зерно, тим більше криві зміщуються вниз і праворуч), вмісту легуючих елементів.

Всі структури, що утворюються під час охолодження внаслідок перетворення аустеніту (перліт, бейніт, мартенсит), нерівноважні, за винятком тих,

що утворюються за умов повільного охолодження або внаслідок ізотермічного розпаду при підвищених температурах перлітного перетворення. Усі ці структури змінюються при нагріванні в інтервалі температур до точки A_1 . Процеси перетворення при нагріванні визначаються дифузією, тому їхній перебіг залежить від температури, тривалості витримування і швидкості нагріву. Для різних вихідних структур підвищення температури виявляється по-різному.

20. Які перетворення відбуваються при нагріванні сталі?

Перетворення в сталі при нагріванні до температур нижче A_1 .

При нагріванні мартенситу до температури вище 100°C з нього починає виділятися вуглець у вигляді метастабільного дуже дрібного ϵ -карбїду (за складом близького до Fe_2C), когерентно пов'язаного з твердим розчином. Такий мартенсит називають відпущеним, або кубічним, оскільки збіднення твердого розчину вуглецем супроводжується зменшенням тетрагональності мартенситу. При температурі вище 200°C створюються умови для розпаду залишкового аустеніту. Він перетворюється на відпущений мартенсит або нижній бейніт. Подальше підвищення температури призводить до відокремлення ϵ -карбїду, і він перетворюється на цементит (Fe_3C). Розміри і форма карбїдних часток при підвищенні температури змінюються. Ферито-карбїдну суміш, що утворюється під час нагрівання і витримування сталі при $450\text{--}650^\circ\text{C}$, називають *сорбітом відпуску* (див. рис. 3.4,б). Нагрівання до температур, близьких до A_1 , призводить до зростання карбїдів і утворення структури (див. рис. 3.3,б) *зернистого перліту* (ферит + глобулярні карбїди).

При нагріванні перліту, який вже є сумішшю фериту з цементитом, структурні зміни зводяться лише до коагуляції (за

температур, значно нижчих A_1) і сфероїдизації (за тривалого витримування) цементиту. Внаслідок цього утворюється структура зернистого перліту.

При нагріванні бейніту карбіди починають коагулювати за нижчих температур у зв'язку з їх меншим розміром і меншою відстанню між частинками. Утворюється сорбітна структура, в якій ферит зберігає форму вихідних голок бейніту. З підвищенням температури і тривалості нагріву розміри карбідів збільшуються, ферит втрачає голчасту форму. За температур, наближених до A_1 , досить швидко утворюється зернистий перліт.

Перетворення сталі при нагріванні до температури вище A_1

Перевищення температури A_1 призводить до початку утворення в перліті на межі розподілу фаз ферит - цементит зародків аустеніту. Зародок аустеніту вміщує приблизно 0,76 % C. За вищих температур вміст вуглецю може змінюватися в межах перетину ізотерми з лінією GSE діаграми стану залізо - вуглець.

Перетворення фериту на аустеніт відбувається до закінчення розчинення карбідних часток. Проте і після розчинення карбідів хімічний склад аустеніту не є однорідним, його гомогенізація відбувається лише за подальшого підвищення температури.

Утворення аустеніту з перліту поділяється на три стадії: утворення аустеніту по всьому об'єму; розчинення карбідних часток; гомогенізація аустеніту. Перебіг цих процесів залежить не лише від температури, а й від швидкості й тривалості нагрівання.

21. Які особливості утворення аустеніту при нагріванні сталі? Як розуміти діаграми ізотермічного перетворення аустеніту?

Перетворення $\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \gamma$ можливе при перегріві сталі вище A_1 , коли $F_\gamma < F_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (див. рис. 3.13). Фази, що беруть участь у перетворенні,

відрізняються вмістом вуглецю, тому цей процес є дифузійним. Перетворення має кристалізаційний характер і відбувається

у спосіб формування зародків аустеніту та їх подальшого зростання. Підвищення температури (ступеня перегріву) призводить до одночасного збільшення різниці вільних енергій ферито-цементитної суміші й аустеніту (ΔF) та коефіцієнта дифузії (D).

Кінетика, тобто швидкість процесу перетворення в ізотермічних умовах, залежить від ступеня перегріву. Час утворення аустеніту за незначного перегріву (близько A_1) вимірюється хвилинами, а за 800-850°C становить 5-15 секунд (рис. 3.18,а).

Кінетичні криві утворення аустеніту узагальнюють цей процес у вигляді діаграми ізотермічного утворення аустеніту для конкретної сталі (рис. 3.18,б). Діаграма унаочнює час, необхідний для перетворення ферито-цементитної суміші на аустеніт залежно від ступеня перегріву. На діаграму нанесено лінії, що відповідають швидкості нагрівання V_1 і V_2 ($V_2 > V_1$). За умови безперервного нагрівання зі швидкістю V_2 перетворення відбувається в інтервалі температур від точки a' до точки b' .

При повільному нагріванні зі швидкістю V_1 процес відбувається в інтервалі нижчих температур (точки a' і b'). Нагрівання з необмежено низькою швидкістю перетне горизонталь A_1 (штрихова лінія) на безмежно далекій відстані, де перетворення $\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \gamma$ відбувається в одній точці. За реальних умов нагрівання перетворення відбувається в інтервалі температур, вищих A_1 . Ефект найбільшого поглинання теплоти (зупинка на кривій нагріву) відповідає температурі точки A_{c1} . Знаходження цієї точки залежить від швидкості нагріву, дисперсності вихідної структури, її морфології, вмісту в сталі вуглецю і легуючих елементів.

По закінченню перетворення $\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \gamma$ утворюється аустеніт, а перліт зникає. Проте цей заново утворений аустеніт неоднорідний навіть в об'ємі одного зерна. У тих місцях зерна, де раніше був цементит, вміст вуглецю підвищений. Задля отримання гомогенного за складом аустеніту сталь нагрівають вище точки A_{c1} або A_{c3} (для доєвтектоїдної сталі) та витримують за цієї температури. Тривалість гомогенізації визначається характером вихідної структури.

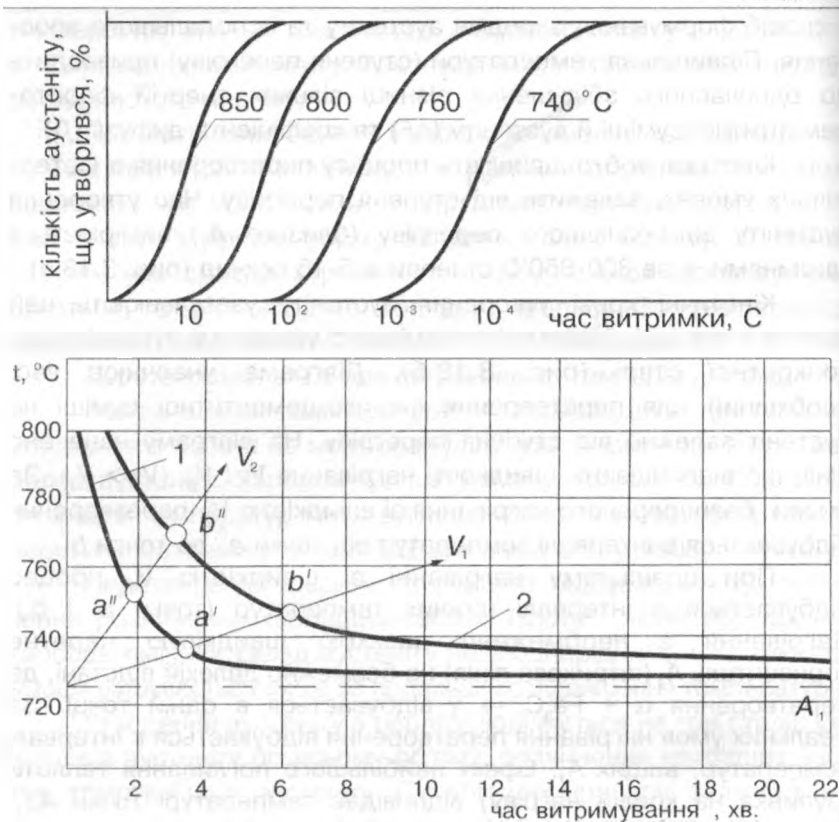


Рис. 3.18,а,б. Кінетичні криві (а) та діаграма ізотермічного утворення аустеніту при нагріванні сталі з 0,86 % С; 1 - початок перетворення $\alpha + \text{Fe}_3\text{C} - \gamma$; 2 - кінець перетворення (б)

22. Зерно в сталі. Які фактори впливають на розміри зерна?

При нагріванні сталі з досягненням нижньої критичної точки A_{c1} починається утворення аустеніту, яке завершується за температури верхньої критичної точки A_{c3} . Розмір аустенітних зерен після завершення поліморфного перетво-

При нагріванні сталі з досягненням нижньої критичної точки A_{c1} починається утворення аустеніту, яке завер-

Ізідізовуглецеві сплави

рення зумовлений величиною вихідного зерна. Подальше нагрівання або витримування сталі у вказаному інтервалі температур призводить до росту аустенітних зерен. Величина зерна впливає не лише на механічні властивості сталі, а й на перетворення в сталі, що відбуваються під час термічної обробки. Термічна обробка дозволяє значною мірою змінювати розміри зерна. Залежно від складу, способу виплавки та умов розкислення сталі мають різну здатність до росту зерна.

Визначають два типи сталей: *спадково дрібнозернисті* і *спадково крупнозернисті*. Перші мають малу швидкість зростання зерна під час нагрівання, другі - підвищену. Повільне зростання зерна при нагріванні під час термічної обробки зумовлює кілька факторів. Найвпливовішим вважають бар'єрну дію дисперсних часток оксидів і нітридів (Al_2O_3 , AlN , TiC , VC , ZrC). Розташовані переважно на границях зерен, вони заважають їх росту. Нагрівання до температур, що перевищують температури розчинення оксидів і нітридів, усуває перешкоди росту зерен. Подальше нагрівання сталі викликає посилене зростання розмірів зерен аустеніту. Може статися так, що зерно спадково дрібнозернистої сталі буде більшим за зерно спадково крупнозернистої сталі.

Розрізняють спадкове і дійсне зерна. *Спадкове* зерно утворюється при нагріванні сталі до певної температури вище Ac_3 і характеризує здатність сталі до росту зерна. *Дійсне* зерно утворюється в сталі після конкретної термічної обробки. Сталі однієї марки і однакової спадкової зернистості можуть мати різне дійсне зерно. Більшість фізико-механічних властивостей сталей зумовлене дійсним зерном.

Металографічно розміри зерен визначають на поверхні шліфа знеуглецьованого (окисний метод) або, навпаки, сильно науглецьованого (цементацийний метод) після охолодження зразка. Температура нагрівання стандартизована і дорівнює $930 \pm 10^\circ C$. Тривалість нагрівання для окисного методу 3 години, для цементацийного - 8 годин. Для цементацийного методу макси-

мальна швидкість охолодження для вуглецевих сталей становить 100°C , а для легованих - $50^{\circ}\text{C}/\text{год}$. При застосуванні окисного методу зразки охолоджують у воді. У першому випадку на краях вихідного зерна аустеніту спостерігають сітку цементиту, а у другому - сітку фериту. Розмір зерна заевтектоїдної сталі можна визначити на зразках, нагрітих до тієї самої температури, без окислення або науглецювання; зерно аустеніту розрізняють за розташуванням заевтектоїдного цементиту.

Широке практичне застосування набув метод візуальної оцінки величини зерна. Він зводиться до оцінки мікроструктури за стандартними шкалами з набором стандартних мікрофотографій (див. рис. 3.19). Умовний номер зерна характеризує кількість зерен, що вміщується на 1 мм^2 поверхні шліфа. Перший номер відповідає 16 зернам на площі 1 мм^2 . Через те, що на площі шліфа зустрічаються зерна різного розміру, площа зерна змінюється в межах 40000-80000 мкм^2 . При збільшенні у 100 разів на площі 10 см^2 спостерігають від 1 до 2 зерен. Зменшення зерна на один номер за шкалою відповідає зменшенню вдвічі його площі або кількості зерен на 1 мм^2 . На рис. 3.20 наведено номограму, що пов'язує середній діаметр зерна, кількість зерен, що припадає на 1 мм^2 шліфа і номер зерна відповідно ГОСТ 5639-82. Для сталей аустенітного, феритного та інших класів існують спеціальні шкали.

Оскільки великозернисту структуру зручніше розглядати за менших, як 100-кратне збільшення, а дрібнозернисту - за більших, у таблиці наведені дані для зведення розмірів зерен до збільшення у 100 разів. Вадю стандартних шкал є їхня ступінчаста структура. Існує й безперервна шкала (шкала Панченко) із зерном, розміри якого змінюються поступово. Проте вона не досить зручна у користуванні через складність зіставлення розмірів зерен з досить вузькою смугою шкали, за якою зерна мають приблизно однаковий розмір. Більш точно розміри зерен визначають у спосіб безпосередніх вимірів діаметрів і площі зерен або з використанням методів математичної статистики.

Залізовуглецеві сплави

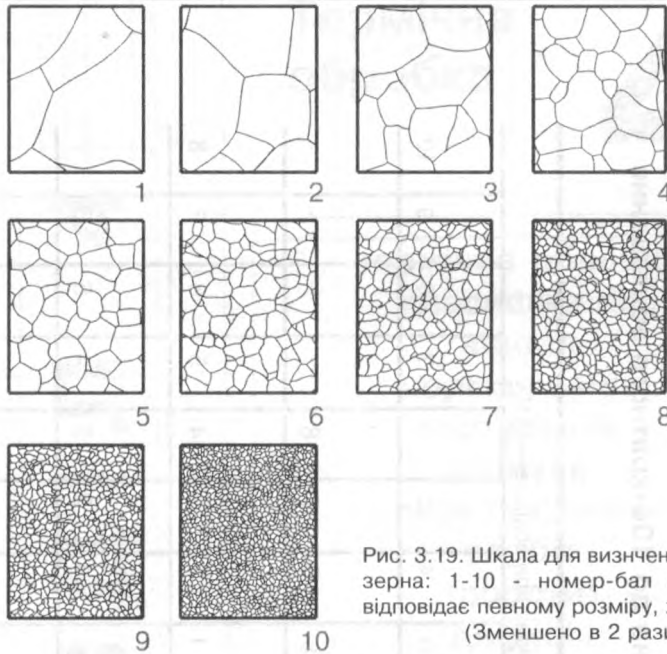


Рис. 3.19. Шкала для визначення розмірів зерна: 1-10 - номер-бал зерна, що відповідає певному розміру, $\times 100$ (Зменшено в 2 рази)

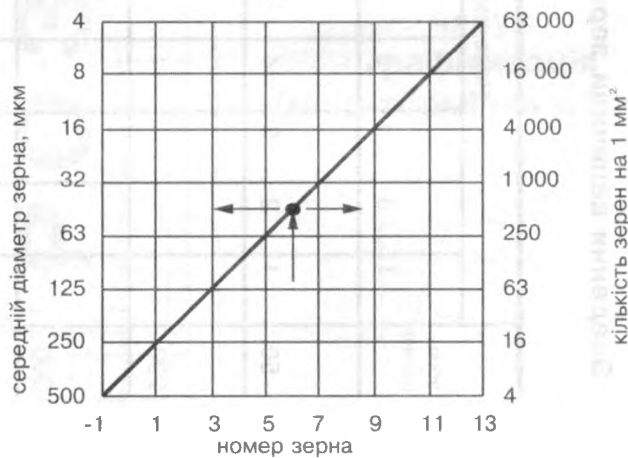


Рис. 3.20. Номограма, що пов'язує номер зерна з кількістю зерен на 1 мм^2 і номером зерна за шкалою ГОСТ 5639-82

Таблиця 3.1

Зведення величини зерна до 100-кратного збільшення

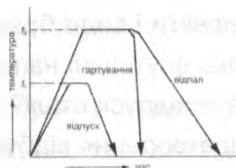
Номер зерна при збільшенні X100													
збіль- шення	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50	1	2	3	4	5	6	7	8	-	-	-	-	
200	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	
300	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	
400	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6

РОЗДІЛ 4

Термічна обробка

4

термічна обробка
класифікація
відпал
нормалізація
гартування
відпуск
перетворення
сорбіт
троостит
дифузія
чавун
графітізація
хіміко-термічна обробка



Питання, висвітлені у розділі 4

1. Що таке термічна обробка?
2. Які фактори впливають на метал під час термічної обробки?
3. Як класифікують основні види термічної обробки?
4. Що таке контрольовані атмосфери?
5. Що таке відпал сталі?
6. Які особливості та різновиди відпалу I роду?
7. Які особливості та різновиди відпалу II роду?
8. Що таке нормалізація і одинарна термічна обробка?
9. Які основні дефекти і види браку виникають під час відпалу?
10. У чому полягає гартування сталі та які види гартування існують?
11. Що таке загартовуваність сталі?
12. Що таке прогартовуваність сталі?
13. Які існують способи гартування?
14. Які середовища використовують для гартування?
15. Які дефекти і види браку виникають при гартуванні?
16. Що таке внутрішні напруження?
17. Що таке відпуск сталі?
18. Які перетворення відбуваються під час відпуску сталі?
19. Які основні дефекти виникають при відпуску сталі?

Питання, висвітлені у розділі 4
(продовження)

20. Що таке старіння сталі?
21. Що таке стабілізація мартенситу?
22. Що таке хіміко-термічна обробка?
23. Як класифікують основні види хіміко-термічної обробки?
24. Чим характеризується процес цементації?
25. Які різновиди азотування та особливості цього процесу?
26. Які різновиди і особливості процесів ціанування і нітроцементації?
27. Які різновиди і особливості процесу дифузійної металізації?
28. Які різновиди і особливості термомеханічної обробки?
29. У чому особливості термічної обробки чавунів?
30. Які основні режими застосовують при термічній обробці сірого чавуну?
31. За якими режимами здійснюють термічну обробку білого чавуну?
32. За якими режимами здійснюють термічну обробку ковкого чавуну?
33. За якими режимами здійснюють термічну обробку високоміцного чавуну?
34. Яким видам хіміко-термічної обробки піддають чавуни?
35. Які основні перетворення відбуваються при термічній обробці кольорових сплавів?
36. Що таке особливі структури?

1. Що таке термічна обробка?

Термічна обробка - це технологічний процес теплової обробки сплавів з метою одержання їхніх нових фізико-механічних властивостей. Під час нагрівання і охолодження сплавів відбуваються відповідні зміни їхньої структури.

На відміну від інших основних операцій технології обробки металів, до яких входить одержання металу певного хімічного складу (металургія) або потрібної форми (лиття, обробка різанням, прокатування, штампування тощо), термічна обробка забезпечує одержання заданої структури і властивостей металу. Застосовується як проміжна і як кінцева операція обробки металовиробів. Проміжна термічна обробка здійснюється для покращення технологічних властивостей металу при обробці його різанням, тиском тощо. Кінцева термічна обробка використовується для одержання оптимальної структури і фазового складу металу, що забезпечують потрібний комплекс властивостей. Різновидами термічної обробки є гартування, відпуск, відпал, старіння та інше.

Можливості зміни властивостей металів засобами термічної обробки досить значні. Так, твердість і міцність сталі при цьому можуть бути збільшені у 2-3 рази. Проте термічна обробка ефективно впливає на властивості лише тих сплавів, які мають не менше двох фаз, спроможних до перетворень при нагріванні та охолодженні. Перетворення однієї фази в іншу або зміна кількісного співвідношення фаз у гетерогенних сплавах призводить до зміни властивостей. Здатність сплаву до термічної обробки визначають на основі діаграм стану. Термічній обробці можуть піддаватися лише ті сплави, компоненти яких утворюють обмежений ряд твердих розчинів, та розчинність котрих змінюється залежно від температури, або сплави, здатні до фазових перетворень. Ефект зміни властивостей залежить також від розміру окремих виділень різних фаз, що визначають мікроструктуру сплаву та їхнє взаємне розташування. Термічна обробка дає змогу якнайповніше реалізувати властивості металу,

Термічна обробка

збільшити експлуатаційні навантаження металовиробів, розширити межі застосування сплавів, підвищити надійність і ресурс виробів машинобудування.

Будь-яка термічна операція зводиться до нагрівання до певної температури, витримування за цієї температури протягом деякого ча-

2. Які фактори впливають на метал під час термічної обробки?

су і охолодження із заданою швидкістю. Виходячи з цього, основними параметрами, що характеризують конкретний режим термічної обробки, є: температура нагрівання металу (t); тривалість витримування при певній температурі (τ); швидкість нагрівання (V_n); та охолодження ($V_{ох}$).

Температуру нагрівання обирають, виходячи з діаграми стану сплаву. При цьому враховують розташування на ній областей, що відповідають певним структурним перетворенням, передбаченими конкретним видом термічної операції.

Швидкість нагрівання повинна забезпечити перебіг необхідних структурних змін у металі без виникнення високих напружень, короблення та тріщин. Швидкість нагрівання залежить також від хімічного складу сплаву, його стану (литий або деформований), розміру виробу, складності його форми тощо.

Тривалість нагрівання (витримування) при певній температурі повинна забезпечити наскрізний прогрів деталі й проходження всіх передбачуваних процесів (фазові перетворення, коагуляція фаз, розчинення карбідів тощо).

Швидкість охолодження визначає вид термічної обробки. Під час гартування вироби охолоджують з великою швидкістю, щоб структура, яка утворилася за високих температур, збереглася і після охолодження. Швидкість охолодження при гартуванні забезпечує вибір відповідного середовища для гартування (вода, масло, розчин солей). Під час відпалу або відпуску, особливо великих зливків і поковок, охолодження здійснюють повільно для отримання зрівноваженої структури і зменшення напружень.

3. Як класифікують основні види термічної обробки?

Різні види термічної обробки можуть бути класифіковані за двома основними ознаками: за граничною температурою нагрівання і швидкістю охолодження.

Залежно від температури нагрівання розрізняють обробку при нагріванні до температур, вищих і нижчих за температуру фазових перетворень (рис. 4. 1).

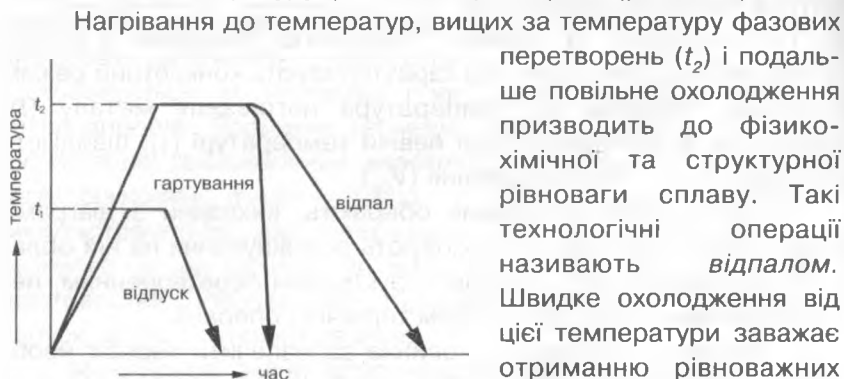


Рис. 4. 1. Схематичне зображення різних операцій термічної обробки

перетворень (t_2) і подальше повільне охолодження призводить до фізико-хімічної та структурної рівноваги сплаву. Такі технологічні операції називають *відпалом*. Швидке охолодження від цієї температури заважає отриманню рівноважних структур. Такий вид термічної обробки називають *гартуванням*.

Нагрівання до температур, нижчих за температуру фазових перетворень (t_1) сприяє наближенню до стану рівноваги. Проте вплив швидкості охолодження металу при цьому незначний. Такі операції називають *відпуском*.

За найпоширенішою класифікацією основних видів термічної обробки А. А. Бочвара, розрізняють чотири основні види термічної обробки.

Відпал I роду - термічна операція, що зводиться до нагрівання металу, який знаходиться в нестійкому стані внаслідок попередньої обробки і переведення його у стійкіший стан. Здійснення такого відпалу не пов'язане з фазовими перетвореннями у твердому стані. Головні значення як параметри, що визна-

Термічна обробка

чають швидкість процесів переходу металу до рівноважного стану, мають при цьому температура нагрівання і тривалість витримання за такої температури. Цей вид обробки придатний для будь-яких металів і сплавів. Різновиди відпаду I роду: дифузійний (гомогенізуючий), рекристалізаційний, відпал для зняття напружень тощо.

Відпал II роду - термічна операція, яка складається з нагрівання вище температури перетворення і подальшого повільного охолодження для отримання структурно-стабільного стану. Внаслідок такого відпалу відбувається перекристалізація. Тому його називають також фазовою перекристалізацією.

Гартування - термічна операція, яка зводиться до нагрівання вище температури перетворення і швидкого охолодження для фіксації структурно-нестійкого стану сплаву. Гартуванню піддають лише метали і сплави, які мають фазові перетворення у твердому стані. Основні технологічні параметри гартування: температура нагрівання, час витримання і швидкість охолодження.

Відпуск - операція нагрівання загартованого сплаву нижче температури перетворення для одержання більш стійкого структурного стану і зняття внутрішніх напружень. Основні технологічні параметри відпуску: температура нагрівання і тривалість витримання за такої температури.

Крім цих основних видів термічної обробки, є ще два види обробки.

Хіміко-технічна обробка (ХТО) - нагрівання сплаву у відповідних хімічних реагентах з метою зміни складу і структури його поверхневих шарів.

Термомеханічна обробка (ТМО) поєднує пластичну деформацію і термічну обробку таким чином, щоб зберегти певною мірою результати наклепування, отже, вплинути на кінетику фазових і структурних перетворень, що відбуваються під час термічної обробки.

Докладніше всі види термічної обробки розглядаються у відповідних розділах.

4. Що таке контрольовані атмосфери?

Під час термічної обробки (при нагріванні) відбувається взаємодія поверхні металу з повітрям або пічними газами. Внаслідок цього починаються процеси окислення (утворюється жаровина) і знеуглецювання поверхневого шару виробів. Змінюючи склад поверхні сталі, ці процеси погіршують якість виробів, призводять до незворотних втрат металу і необхідності в трудомістких очисних операціях.

Окислення сталі відбувається внаслідок хімічної взаємодії кисню і газів, що містять кисень, з залізом та легуючими елементами і спостерігається з появою кольорів мінливості ($> 200^{\circ}\text{C}$). Підвищення температури посилює окислення і супроводжується утворенням жаровини.

Знеуглецювання активно починається за температури вище 700°C і, збіднюючи поверхню металу вуглецем, погіршує властивості виробів при експлуатації.

Для захисту виробів від окислення і знеуглецювання при нагріванні металу в печах застосовують спеціальні газові середовища - *контрольовані атмосфери*. За характером взаємодії з поверхнею металу контрольовані атмосфери поділяють на відновлюючі (CO , H_2 , насичені водневі сполуки вуглецю CH_4 , ненасичені C_3H_6) та окислюючі й знеуглецюючі (O_2 , пара H_2O , CO_2 і H_2).

Оптимальний склад контрольованої атмосфери регулюється зміною вмісту основних компонентів H_2O , або CO_2). Як захисну атмосферу використовують також інертні гази (аргон, гелій) і вакуум. Важливою вимогою використання контрольованих атмосфер є забезпечення захисту процесу від вибуху.

Захист металу від окислення і знеуглецювання дозволяє підвищити міцність і ресурс роботи виробів на 15-30 %, а відсутність жаровини - зекономити до 3 % маси металу, що підлягає обробці.

Термічна обробка

Відпал - це термічна операція, що складається з нагрівання до певної температури, витримування і наступного повільного охолодження з метою отримання рівноважнішої структури. Розрізняють відпали I і II роду. *Відпал I роду* застосовують для здійснення процесів гомогенізації, рекристалізації та зняття залишкових напружень. Ці процеси відбуваються незалежно від перебігу фазових перетворень. *Відпал II роду* застосовують для одержання практично рівноважного стану. Він може бути повним, неповним, низьким, ізотермічним, сфероїдизуючим. Структуру і властивості сталі, що формуються під час відпалу II роду, визначають фазові перетворення, які відбуваються при цьому. Температурні інтервали нагрівання для різних видів відпалу показані на рис. 4.2.

**5. Що
таке
відпал
сталі?**

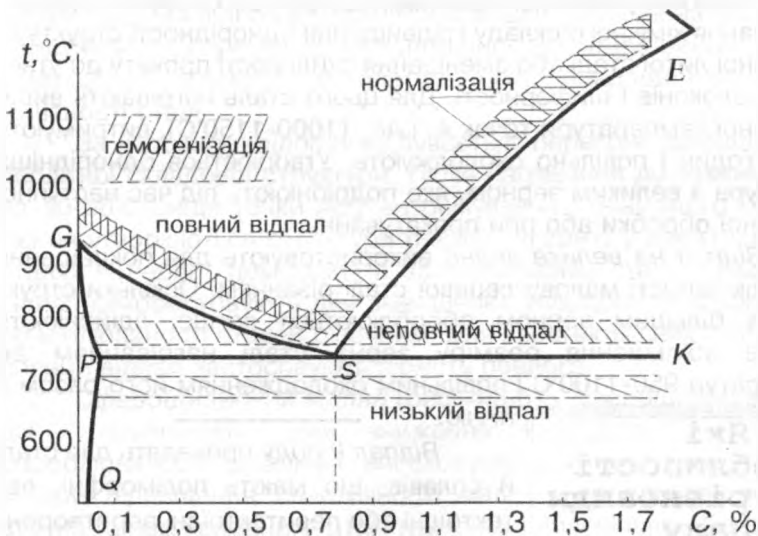


Рис. 4.2. Температурні інтервали відпалу і нормалізації вуглецевих сталей

6. Які особливості та різновиди відпалу I роду?

Відпал I роду - термічна операція, під час якої зазвичай не відбуваються фазові перетворення (перекристалізація). Якщо фазові перетворення все ж таки здійснюються, вони істотно не впливають на властивості сталі.

Рекристалізаційний відпал застосовують для зменшення твердості наклепаної холоднодеформованої сталі, підвищення її в'язкості, отримання певного розміру зерна. Для цього сталь нагрівають до температури початку рекристалізації (але нижче критичної точки), витримують 3-6 годин та повільно охолоджують до 500°C і далі на повітрі. Внаслідок цього замість структури деформованого металу утворюється рівноважна дрібнозерниста структура, вільна від залишкових напружень.

Гомогенізуючий (дифузійний) відпал застосовують для вирівнювання хімічного складу і підвищення однорідності структури легованої литої сталі або зменшення схильності прокату до утворення флокенів і шиферності. Для цього сталь нагрівають вище критичної температури точок A_3 і A_{cm} (1000-1150°C), витримують 10-15 годин і повільно охолоджують. Утворюється однорідніша структура з великим зерном, яке подрібнюють під час наступної термічної обробки або при прокатуванні.

Відпал на велике зерно використовують для покращення оброблюваності маловуглецевої сталі різанням. Оскільки структури з більшим зерном оброблюються легше, здійснюють штучне збільшення розміру зерна сталі нагріванням до температур 950-1100°C і повільним охолодженням його разом з піччю.

7. Які особливості та різновиди відпалу II роду?

Відпал II роду провадять для сталі й сплавів, що мають поліморфні, евтектоїдні або перитектоїдні перетворення, а також у разі перемінної розчинності в твердому стані. При відпалі II

роду фазові перетворення (перекристалізація) визначають його цільове призначення.

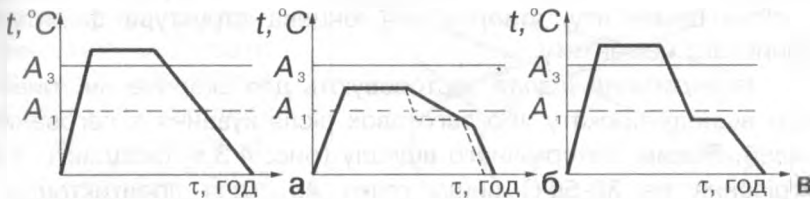


Рис. 4.3. Схеми режимів відпалу: а - повного, б - сфероїдизуючого, в - ізо-термічного

Залежно від змін, що відбуваються в структурі сталі, відпал може бути повним, неповним, сфероїдизуючим та ізотермічним (рис. 4.3).

За *повного відпалу* (рис. 4.3,а) відбувається фазова перекристалізація феритної й перлітної складової структури при температурі вище на $30-50^{\circ}\text{C}$ A_{c3} і охолодженні зі швидкістю $20-200^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Остання залежить від складу сталі, маси і форми деталі. Повний відпал використовують для зменшення твердості, напружень, структурної неоднорідності, подрібнення зерна, підвищення в'язкості й пластичності, покращення оброблюваності сталі.

За *неповного відпалу* відбувається перекристалізація лише перлітної складової структури. Після нагрівання до температури на $40-60^{\circ}\text{C}$ вище точки A_{c1} , витримування і повільного охолодження утворюються структури (перліт і ферит) у доевтектоїдних сталях і (перліт, цементит) в заевтектоїдних сталях. Неповний відпал використовують для зменшення твердості й покращення оброблюваності сталей різанням. Для заевтектоїдних сталей неповний відпал застосовують замість повного.

Сфероїдизуючий відпал (рис. 4.3,б) - сфероїдизація карбідів - здійснюють для зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням високовуглецевих інструментальних сталей підвищення пластичності мало- і середньовуглецевих сталей перед холодним штампуванням і волочінням. До режиму такого відпалу входять нагрівання до температури, дещо вищої від A_{c1} , тривале витримування, повільне охолодження ($30-40^{\circ}\text{C}/\text{год.}$) до 600°C і далі на повітрі або циклічне багаторазове нагрівання вище точки A_{c1} і охолодження нижче точки A_{r1} . При

цьому відбувається усунення пластинчастого і змішаного перліту та сітки цементиту, утворюється кінцева структура фериту і зернистого цементиту.

Ізотермічний відпал застосовують для скорочення тривалості відпалу прокату або заготовок після кування з легованих сталей. Режим ізотермічного відпалу (рис. 4.3,в) складається з нагрівання на 30-50°C вище точки A_{c_3} (для доєвтектоїдних сталей) і вище точок A_{c_1} або A_{c_m} (для заєвтектоїдних), витримання, прискореного охолодження до температури найменшої стабільності аустеніту (650-680°C), витримання до повного розпаду аустеніту за цієї температури, охолодження на повітрі. За такого відпалу відбувається утворення аустеніту з наступним ізотермічним розпадом його на ферито-карбідну суміш. Кінцева структура - пластинчастий перліт і ферит (у заєвтектоїдній сталі - перліт і цементит).

8. Що таке нормалізація і одинарна термічна обробка?

Нормалізацію (нормалізаційний відпал) здійснюють при температурах вище точки A_{c_3} (для доєвтектоїдної сталі) або A_{c_m} (для заєвтектоїдної) з наступним охолодженням на спокійному повітрі для отримання дрібного зерна та рівномірного розподілу структурних складових (рис. 4.4). Під час нормалізації відбувається повна фазова перекристалізація, а наступне охолодження на повітрі супроводжується перетворенням аустеніту на ферито-цементитну однорідну дрібнозернисту суміш.

Нормалізація є ефективним засобом усунення грубозернистої структури після лиття і кування. Нормалізацію низьковуглецевих сталей застосовують замість відпалу. Виливки середньовуглецевих сталей нормалізують замість гартування, щоб зменшити короблення і тріщиноутворення. Для виправлення структури легованих сталей використовують нормалізацію з високим відпуском замість повного відпалу. Порівняно з відпалом нормалізація - дешевша за термічну операцію, оскільки печі використовують лише для нагрівання і витримання при температурі нормалізації.

Термічна обробка

У разі охолодження сталі у струмені повітря, тобто за умов підвищеної швидкості охолодження, достатньої для перетворення в районі вигину *S*-кривої (рис. 4.4) нормалізацію називають *одинарною термічною обробкою*. Цей термін запропонував М. А. Мінкевич у 1935 р. Таку операцію застосовують, коли необхідно уникнути гартування, і при цьому одержати твердість вищу, ніж за нормалізації.

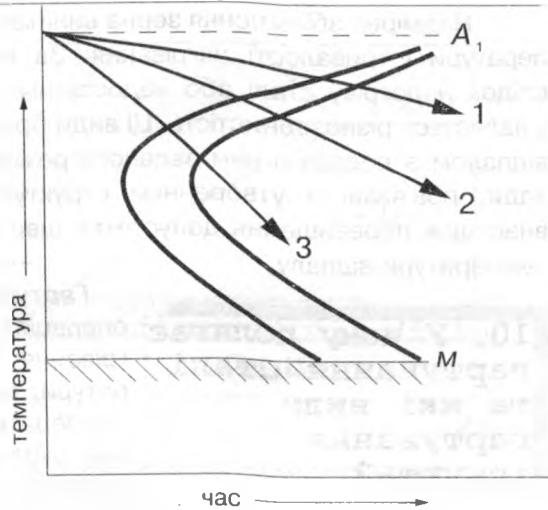


Рис. 4.4. Криві охолодження для відпалу (1), нормалізації (2), одинарної термічної обробки (3), накладені на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту

Неправильний вибір або порушення режиму відпалу призводить до утворення дефектів, небажаних структури і механічних властивостей сталі.

Утворення тріщин (дефект непоправний) виникає при високих швидкостях нагрівання внаслідок значних внутрішніх напружень у легованих сталях. У разі перевищення температури і тривалості відпалу спостерігається надмірне збільшення розміру зерна, утворення оксидів, оплавлення металу на границях зерен. Невиправний дефект - перепал. При нагріванні в окисній атмосфері й перевищенні тривалості відпалу, а також при нагріванні в нерозкислених соляних ваннах може статися окислення і знеуглецювання поверхні сталі (дефект важко виправити).

9. Які основні дефекти і види браку виникають під час відпалу?

Надмірне збільшення зерна виникає при перевищенні температури і тривалості нагрівання. За неповного відпалу внаслідок недогріву сталі або недостатньої тривалості нагрівання з'являється різнозернистість. Ці види браку усувають повторним відпалом з додержанням заданого режиму. Так само усувають вади, пов'язані з утворенням структур перліту або сорбіту внаслідок перевищення допустимої швидкості охолодження від температури відпалу.

10. У чому полягає гартування сталі та які види гартування існують?

Гартування - це термічна операція, яка складається з нагрівання сталі до певної температури, витримування її при цій температурі з наступним швидким охолодженням з метою отримання нерівноважної структури та зміцнення сталі.

Гартування з поліморфним перетворенням зводиться до нагрівання вище точки A_{c3} (для доєвтектоїдної сталі) або A_{c1} (для заєвтектоїдної сталі), витримування і охолодження зі швидкістю, що перевищує критичну і забезпечує отримання переважно мартенситної або трооститної структури. *Критичною швидкістю гартування* називають мінімальну швидкість охолодження, необхідну для розпаду аустеніту в інтервалі мартенситного перетворення. Чим менша критична швидкість гартування, тим легше переохолодити аустеніт до температури мартенситного перетворення.

Залежно від температури нагрівання розрізняють повне і неповне гартування. При *повному гартуванні* сталь нагрівають на 30-60°C вище A_{c3} (вище лінії GS на рис. 4.5) для отримання вихідної структури аустеніту. Повному гартуванню піддають лише доєвтектоїдні сталі.

За *неповного гартування* доєвтектоїдну сталь нагрівають в інтервалі температур A_{c1} і A_{c3} (на 30-50°C вище A_{c1} до 760-780°C). Неповному гартуванню звичайно піддають завтектоїдні сталі. Вихідна структура - аустеніт з цементитом. Останній зберігається у структурі, оскільки він має вищу твердість

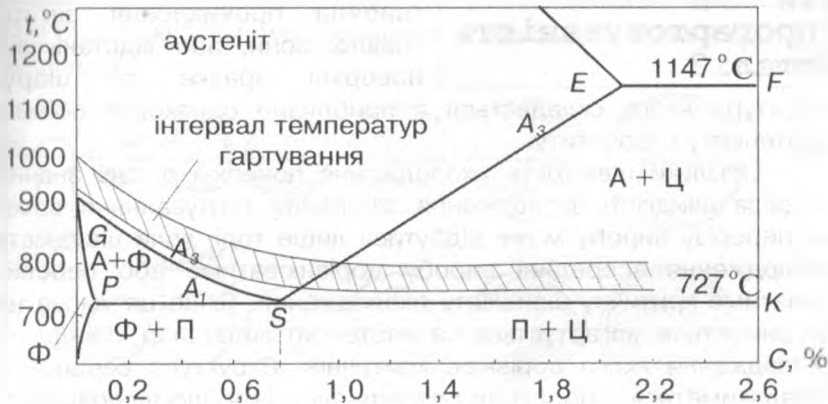


Рис. 4.5. Температурний інтервал гартування вуглецевих сталей

порівняно з одержуваним після гартування мартенситом.

Тривалість нагрівання залежить від розмірів виробів, маси, усадки. Для забезпечення потрібної швидкості охолодження використовують різні середовища гартування (воду, масло, водні розчини солей тощо). Залежно від способу охолодження розрізняють гартування з безперервним охолодженням, сходинкове, ізотермічне, переривчасте, з самовідпуском тощо.

Гартування без поліморфного перетворення складається з нагрівання сталі до температури розчинення надлишкових фаз, витримання і швидкого охолодження для попередження виділень надлишкових фаз з пересиченого твердого розчину. Таку обробку використовують для одержання гомогенної структури.

Загартовуваність - це здатність сталі набувати максимальної твердості внаслідок гартування.

Визначається вона вмістом вуглецю в сталі. Низьковуглецеві сталі (до 0,20 % вуглецю) практично не загартовуються, оскільки їхня твердість внаслідок гартування майже не підвищується.

11. Що таке загартовуваність сталі?

12. Що таке прогартуваність сталі?

структура якого складається з приблизно однакових об'ємів мартенситу і трооститу.

Оскільки швидкість охолодження поверхні деталі значно вища за швидкість охолодження серцевини, гартування по всьому перерізу виробу може відбутися лише тоді, коли швидкість охолодження всередині виробу дорівнюватиме або перевищуватиме критичну швидкість охолодження. Якщо ця умова не дотримується, загартується на мартенсит лише шар, швидкість охолодження якого дорівнює критичній. Структура серцевини складатиметься з продуктів розпаду аустеніту, що відповідають швидкостям охолодження центральної зони (рис. 4.6). Цим пояснюється відсутність наскрізної прогартуваності.

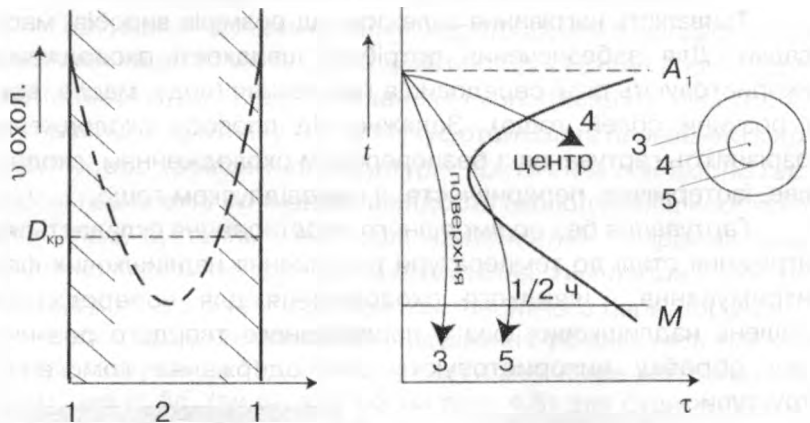


Рис. 4.6. Схеми різних швидкостей охолодження по перерізу сталі та її прогартуваності: 1 - загартована зона, 2 - незагартована зона, 3 - охолодження поверхні сталі, 4 - охолодження центру, 5 - охолодження проміжного шару

Прогартуваність характеризує параметр критичного діаметра ($D_{кр}$). Це максимальний діаметр циліндричного зразка, що прогартувався наскрізь у даному охолоджувальному середовищі. Розподіл загартованої (незаштрихована частина) і незагартова-

Термічна обробка

ної зон (рис. 4.7) при гартуванні у воді та маслі свідчить, що кожному охолоджувальному середовищу відповідає певний критичний діаметр.

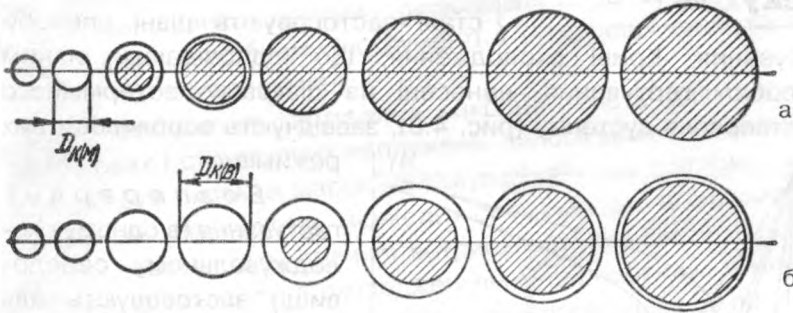


Рис. 4.7. Прогартовуваність циліндрів різного перерізу (заштриховане незагартоване осердя) при гартуванні: а - у маслі, б - у воді

Масло охолоджує повільніше, ніж вода, тому $D_{к(м)} < D_{к(в)}$. Щоб у визначенні прогартованості уникнути залежності від способу охолодження, введено поняття *ідеального критичного діаметру* (D). Це діаметр найбільшого циліндра, який при охолодженні прогартовується з ідеальною швидкістю (поверхня охолоджується з необмежено високою швидкістю) від температури гартування до кімнатної температури. Критичний діаметр - важлива і зручна характеристика для визначення режиму гартування сталевих виробів.

Знаючи один з критичних діаметрів ($D_{к(в)}$, $D_{к(м)}$) та використовуючи відповідні номограми можна визначити інші та обрати режим термічної обробки, що забезпечує наскрізне гартування. Вироби з розмірами, меншими від критичного діаметра, прогартовуються в даному охолоджувачі наскрізь. Знання критичного діаметра уможливорює правильний вибір сталі для деталей певних розмірів і призначення. Прогартованість кожної сталі визначають експериментально. Найпростіший спосіб - стандартний метод торцевого гартування.

13. Які способи гартування існують?

гартування. Криві охолодження, що відповідають різним способам гартування, нанесені на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 4.8), засвідчують особливості цих

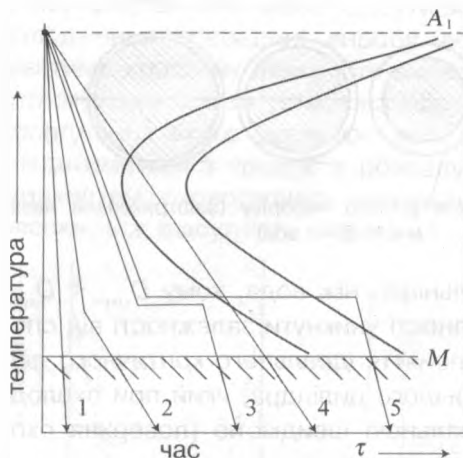


Рис. 4.8. Криві охолодження деяких способів гартування, нанесені на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту: 1 - безперервне, 2 - переривчасте, 3 - сходинкове, 4 - неповне, 5 - ізотермічне

режимів. (порівняно з напруженнями за звичайних способів гартування) застосовують *гартування з підстужуванням*, яке зменшує різницю температур виробів і охолоджувального середовища.

Переривчасте гартування (у двох середовищах) застосовують для зниження структурних напружень. Охолодження у воді здійснюють до температури, яка дещо перевищує температуру початку мартенситного перетворення (1 с на кожні 3-5 мм діаметра) з наступним охолодженням у маслі або на повітрі.

Залежно від потрібного комплексу властивостей виробів зі сталі, форми виробів, призначення, марки сталі застосовують різні способи гартування. Криві охолодження, що відповідають різним способам гартування, нанесені на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 4.8), засвідчують особливості цих режимів.

Безперервне гартування (в одному охолоджувальному середовищі) застосовують для деталей простої форми з метою отримання високої твердості й зносостійкості. Охолоджувальним середовищем служить переважно вода або масло. Кінцева структура - мартенсит і залишковий аустеніт або мартенсит, карбід і залишковий аустеніт залежно від вмісту вуглецю в сталі. Для зменшення термічних напру-

Сходинкове гартування - гартування з охолодженням у середовищі з температурою, дещо вищою за M_n (в солях) у зоні проміжного розпаду, витримуванням без перетворення аустеніту та наступним охолодженням з меншою швидкістю. Здійснюють для зменшення напружень, деформації та запобігання утворенню тріщин у дрібному інструменті з вуглецевої сталі та у більшому - з легованої сталі.

Ізотермічне гартування використовують для зменшення теплових і структурних напружень, запобігання тріщин і деформації. Для окремих марок конструкційної сталі ізотермічним гартуванням підвищують міцність і опір відриву, а інструментальних - пластичність, границі витривалості, зносостійкість. Гартування здійснюють з охолодженням у середовищі, температура якого вища за M_n , з ізотермічним витримуванням до повного або неповного перетворення аустеніту (у розплавах солей) і подальшим охолодженням на повітрі. Кінцева структура - бейніт або бейніт і карбіди, іноді також мартенсит і залишковий аустеніт.

Гартування з самовідпуском передбачає охолодження лише поверхні або частини виробу і відпуск за рахунок залишкового внутрішнього тепла з метою одержання мартенситу відпуску або структури продуктів розпаду мартенситу. Виріб занурюється у воду або масло, після чого охолоджується на повітрі. При цьому загартована зона відпускається за рахунок тепла серцевини або тієї частини, що не була занурена у рідину гартування. Застосовують для зменшення залишкових напружень і як заміну наступного низького відпуску. В окремих випадках - для місцевого гартування (обробка зубила), при індукційному поверхневому гартуванні.

Поверхнєве гартування використовують для отримання твердої зносостійкої поверхні при збереженні в'язкої серцевини. Завдяки індукційному або газоплазмовому нагріванню поверхні виробу, серцевина після охолодження залишається незагартованою.

Світле гартування здійснюють при нагріванні в захисній атмосфері та охолодженні в розплавлених лугах. Використовують

для попередження окислення і знеуглецювання, збереження чистоти поверхні.

Гартування з обробкою холодом застосовують для усунення залишкового аустеніту і стабілізації розмірів виробів, підвищення твердості та зносостійкості. Охолюють до температури нижче 0°C , але в інтервалі $M_n - M_k$ з метою додаткового перетворення аустеніту на мартенсит.

Метод обробки холодом запропонував О. П. Гуляєв у 1937-1939 рр. Звичайно використовують охолодження до температури близько -80°C . Щоб уникнути стабілізації аустеніту, обробку холодом бажано здійснювати одразу після гартування. Обробка холодом не зменшує внутрішнє напруження і потребує подальшого відпуску.

Гартування з прокатного нагріву здійснюють, щоб уникнути повторного нагріву. Оскільки температура нагріву під прокатування вища за температуру гартування, аустеніт гомогенізується, збільшується розмір зерен, а під час деформації і перекристалізації зерна подрібнюються. Цей спосіб гартування застосовують лише для доєвтектоїдної сталі, яку після гартування піддають високому відпуску.

14. Які середовища використовують для гартування?

Задані фізико-механічні властивості отримують у процесі гартування і наступного відпуску за допомогою певного середовища гартування, яке забезпечує швидкість охолодження металу. Основними вимогами до середовища гартування є висока охолоджувальна здатність в інтервалі температур $650-550^{\circ}\text{C}$ ($V_{\text{ох}} = 150-500^{\circ}\text{C/c}$), що відповідає температурам найменшої стабільності аустеніту і зумовлює перетворення більшої кількості його на мартенсит; низька охолоджувальна здатність в інтервалі $300-200^{\circ}\text{C}$ ($V_{\text{ох}} = 10-20^{\circ}\text{C/c}$), коли відбувається перетворення аустеніту на мартенсит. Це необхідно для зменшення внутрішніх напружень, що виникають через перебудову гранецентрованої кубічної ґратки аустеніту на

Термічна обробка

об'ємно-центровану кубічну (тетрагональну) гратку мартенситу, які мають різний питомий об'єм.

Для охолодження металу під час гартування з певною швидкістю використовують різні середовища, які можна поділити на такі основні групи: вода і водні розчини, масло та інші органічні рідини, емульсії, розплави солей і лугів.

Вода - дешеве, поширене і різко охолоджуюче середовище. Вона дозволяє отримувати необхідну твердість і прогартуваність великогабаритних виробів. Проте велика швидкість охолодження в інтервалі мартенситного перетворення викликає підвищені внутрішні напруження під час гартування і, як наслідок, відбуваються деформації й утворюються тріщини. Різні домішки впливають на охолоджувальну здатність води. Так, NaCl і луги (5-10 %) значно підвищують її охолоджувальну здатність. Розчин KMnO_4 (5-7%) знижує швидкість охолодження в інтервалі мартенситного перетворення (середня між чистою водою і маслом). Розчини лугів, солей, гліцерину у воді дедалі ширше застосовують при гартуванні, оскільки це забезпечує інтенсивне охолодження в перлітному інтервалі, сповільнене та рівномірне в області низьких температур.

Охолоджувальна здатність водоповітряних сумішей, що подають на поверхню виробів через форсунки, може змінюватися у широких межах і залежить від кількості води, інтенсивності подачі суміші та відстані форсунок від охолоджуваної поверхні.

Масло має меншу охолоджувальну здатність порівняно з водою, особливо в інтервалі мартенситного перетворення. Ця здатність залежить від в'язкості (температури). З підвищенням температури масла його в'язкість зменшується і завдяки цьому підвищується охолоджувальна здатність. Краща охолоджувальна здатність індустриального масла 12 і 20 відповідає температурам 40-80°C. Масляні середовища в процесі експлуатації можуть окислюватися, розкладатися з утворенням диму, пари, нагару на металі.

Розплави солей і лугів дозволяють у певних випадках отримувати високі механічні властивості сталі з мінімальною де-

формацією, уникнути утворення тріщин. Проте солі та луги мають низьку теплопровідність, потребують обладнання для перемішування і вентиляції. Гартувальна спроможність розплавів солей і лугів найнижча (емульсійних середовищ - помірна).

Киплячий шар - охолодження виробів у середовищі дрібних твердих часток (наприклад, піску), які підтримують у взваженому стані продуванням повітря або газів. Швидкість охолодження в киплячому шарі посідає проміжне місце між швидкістю охолодження в маслі й на повітрі. Вона залежить від тиску і температури повітря (газу). Гартування в киплячому шарі забезпечує рівномірність охолодження, відсутність парової сорочки і корозії поверхні.

15. Які дефекти і види браку виникають при гартуванні?

Неправильний вибір режиму гартування або його недотримання призводять до виникнення певних дефектів.

Утворення тріщин (невиправний брак) є наслідком високої швидкості нагрівання або охолодження, що перевищує критичну швидкість гартування.

Недостатня твердість (відхилення від ТУ) може мати місце у разі невдалого вибору середовища гартування або заниженої температури гартування і недостатньої тривалості нагрівання. Неправильне занурення деталі у середовище гартування призводить до нерівномірної твердості. Різна твердість сталі по об'єму спостерігається також за неповного розчинення фериту в аустеніті в доевтектоїдних вуглецевих і легованих сталях під час нагрівання нижче температури A_{c3} . Ферито-цементитна суміш різного ступеня дисперсності утворюється за швидкості охолодження меншої за критичну швидкість гартування. Ці дефекти виправляють відпалом і повторним гартуванням з дотриманням заданого режиму. Повторне гартування без попереднього відпалу може призвести до утворення нафталінового зламу (грубо кристалічний злам з блиском). Перегрів сталі спричинює збільшення розмірів зерна і утворення великого голчастого мартенситу (виправляють відпалом і повторним гартуванням).

Термічна обробка

Короблення виробів спостерігається у разі їхнього нерівномірного нагрівання і охолодження.

Під час термічної обробки сталі мають місце об'ємні зміни, які залежать від температури і структурних перетворень. Так, перетворення аустеніту на мартенсит супроводжується збільшенням об'єму до 3 %. Оскільки перетворення відбуваються неодноразово і не по всьому об'єму (особливо у великих виробах і виробах складної форми) і зумовлене різною швидкістю охолодження, це призводить до утворення тріщин, короблення тощо. Розрізняють внутрішні напруження трьох видів.

16. Що таке внутрішні напруження?

Внутрішні напруження I роду - це зональні напруження, які виникають між різними частинами виробу. Чим більша різниця температур (градієнт) між окремими частинами деталі в процесі термічної обробки, тим більшого рівня досягають напруження. Вони залежать від швидкості та рівномірності охолодження, розмірів виробу, форми деталі, а також від властивостей самого металу. У разі малої пластичності металу внутрішні напруження, що виникають, не завжди знімаються (релаксуються) внаслідок пластичної деформації. Якщо ці напруження за величиною перевищують поріг міцності, утворюються тріщини. Під час нагрівання у поверхневих шарах металу діють напруження стискування, всередині - розтягування; при охолодженні навпаки - на поверхневі шари, які мають більш низьку температуру, діють напруження розтягування, а на серцевину - напруження стискування. Внутрішні напруження I роду іноді називають *термічними напруженнями*.

Внутрішні напруження II роду виникають між різними фазами внаслідок різних коефіцієнтів лінійного розширення або утворення нових фаз з різними об'ємами. Вони не залежать від факторів, які зумовлюють внутрішні напруження першого роду. Оскільки ці напруження виникають між окремими елементами структури, їх називають також *структурними напруженнями*.

Внутрішні напруження III роду виникають в об'ємах, що відповідають кільком елементарним коміркам кристалічної ґратки. Наприклад, інородний атом у твердому розчині створює довкола себе пружні викривлення кристалічної ґратки металу розчинника

Якими б не були напруження, зрештою, вони викликають однаковий ефект, створюючи пружні деформації та викривлення кристалічної ґратки.

Загартована сталь після охолодження завжди знаходиться в структурно напруженому стані. Напруження, що зберігаються у виробках після їх охолодження, називають *залишковими*. Відпуск є необхідним і надійним заходом для зменшення негативного впливу залишкових напружень. Після проведення відпуску при 550°C напруження гартування практично зникають.

17. Що таке відпуск сталі?

Відпуск - нагрівання загартованої сталі до певної температури (нижче A_{c1}), витримування її за цієї температури та поступове охолодження до кімнатної температури. Це завершальна операція термічної обробки сталі. Мета відпуску - переведення нерівноважної структури загартованої сталі в рівноважніший стан і надання потрібних властивостей (підвищення в'язкості, пластичності, зменшення твердості). Відпуском знімають також внутрішні напруження, які виникають під час гартування. Загартовану сталь нагрівають до температури нижче критичної точки A_{c1} , витримують за цієї температури і поступово охолоджують (переважно на повітрі) до кімнатної температури. Залежно від температури нагрівання розрізняють низький, середній і високий відпуск.

Низький відпуск здійснюють за температур 150-250°C для зменшення внутрішніх напружень у сталі. Тривалість нагрівання деталей середніх розмірів - 1,5-3 години. При цьому тетрагональний мартенсит гартування перетворюється на мартенсит відпуску (кубічний), дещо знижується твердість ($HRC \approx 58-63$) і

Термічна обробка

крихкість. Низькому відпуску піддають різальні та вимірювальні інструменти з вуглецевих і легованих сталей після гартування, а також вироби після цементації.

Середній відпуск відбувається при температурах 300-400°C. Залишковий аустеніт розпадається, утворюється збіднений на вуглець мартенсит і карбідні частки (цементит). Із підвищенням температури мартенсит розпадається на дисперсну ферито-карбідну суміш (троостит відпуску), внутрішні напруження остаточно знімаються. Середній відпуск забезпечує високу в'язкість сталі, знижує твердість до 40-50 HRC та опір розриву. Застосовується для обробки деталей, що працюють за умов тертя, штампів, пружин, ресор тощо.

Високий відпуск (при 450-680°C) значно знижує твердість та опір сталі розриву, підвищує пластичність і ударну в'язкість. Під час нагрівання відбуваються збільшення розміру і сфероїдизація дисперсних карбідних часток, зростає феритне зерно і утворюється сорбіт відпуску. Високий відпуск застосовують для обробки деталей з вуглецевих і спеціальних сталей, що працюють при підвищених і динамічних навантаженнях (вали, осі, елементи кріплення).

Таким чином, троостит можна отримати не лише з аустеніту безпосередньо гартуванням, а й у спосіб відпуску мартенситу. На відміну від трооститу і сорбіту гартування, аналогічні структури відпуску мають зернисту будову. Ресурс роботи деталей, які піддавалися відпуску, значно вищий, ніж за структурою гартування. Тому на практиці частіше застосовують гартування з відпуском. Термічну обробку, що складається з гартування і високого відпуску, називають *поліпшенням*.

Нестабільна структура загартованої сталі в процесі відпуску прагне перейти у рівноважніший стан. Нагрівання полегшує цей процес, оскільки з підвищенням температури збільшується рухливість атомів. Розглянемо основні перетворення, що відбуваються під час відпуску.

18. Які перетворення відбуваються під час відпуску сталі?

1. *Розпад мартенситу.* Спочатку при температурі 100-150°C утворюється мартенсит відпуску, який за температур 150-300°C розпадається на ферито-карбідну суміш (троостит відпуску).

2. *Розпад залишкового аустеніту.* При температурі 200-300°C утворюється ферито-карбідна суміш.

3. *Релаксаційні процеси.* При температурі 300-400°C відбуваються процеси, пов'язані зі зменшенням викривлень кристалічної ґратки і зняттям внутрішніх напружень.

4. *Перетворення пластинчастих карбідів на сферичні.* На час завершення третього перетворення закінчується розпад мартенситу з утворенням дуже дрібної ферито-карбідної суміші. При 300-400°C дрібні карбідні частки об'єднуються у більші (коагуляція). При температурах понад 400°C процес розвивається і супроводжується сфероїдизацією (скругленням) карбідних пластин, пластинчасті карбіди перетворюються на сферичні.

Таким чином, структуру відпущеної сталі визначають процеси, що відбуваються в загартованій сталі під час нагрівання. Вони залежать в основному від температури і тривалості нагрівання. При відпуску утворюються структури (троостит і сорбіт) подібні до аналогічних структур гартування. Вони мають практично однакову твердість і міцність, але різні пластичність і в'язкість. Це пояснюється тим, що троостит і сорбіт гартування (ферито-цементитна суміш) мають пластинчасту будову, а троостит і сорбіт відпуску - зернисту (див. рис. 3.4).

19. Які основні дефекти виникають при відпуску сталі?

Недотримання режиму відпуску призводить до зниження чи підвищення твердості й міцності сталі, виникнення відпускнуї крихкості.

Зниження твердості й міцності сталі спостерігається у разі перевищення температури відпуску, підвищення твердості й міцності - при відпуску нижче встановленої температури. Недостатню твердість і міцність виправляють відпалюванням, повторним гартуванням і відпуском з дотриманням заданого режиму.

Термічна обробка

Завищення твердості й міцності виправляють повторним відпуском при певній температурі.

Відпускна крихкість (зниження ударної в'язкості) сталі спостерігається після відпуску деяких вуглецевих доєвтектоїдних і легованих сталей. Розрізняють відпускну крихкість I і II роду (рис. 4.9, крива 1).

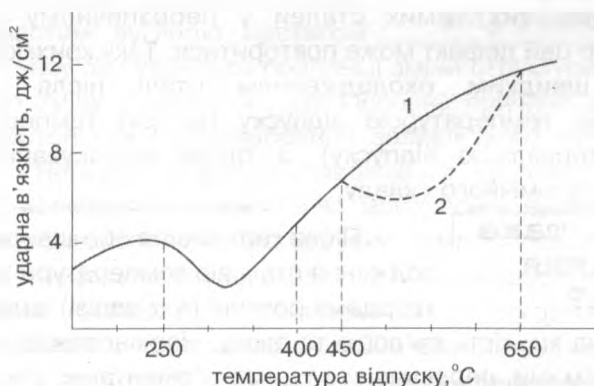


Рис. 4.9. Схема впливу температури відпуску на ударну в'язкість сталі з високою схильністю до відпускну крихкості: 1 - швидке охолодження у воді або маслі, 2 - повільне охолодження на повітрі або з піччю

Відпускна крихкість I роду може спостерігатися при відпуску в інтервалі 250-400°C і не залежить від швидкості охолодження. Її пов'язують з нерівномірністю перетворення мартенситу відпуску. Прискорений перебіг цього процесу поблизу границь зерен створює там підвищену концентрацію напружень. Внаслідок цього вони стають крихкими. Таку крихкість називають «незворотною», оскільки повторний відпуск при цій самій температурі її не усуває. Ударну в'язкість підвищують повторним відпуском при температурі понад 400°C.

Відпускна крихкість II роду спостерігається в легованих сталях під час повільного і тривалого охолодження їх у межах 450-660°C (рис. 4.9, крива 2). Діапазон температур відпускну

крихкості різних сталей різний і може коливатися у межах від 400°C до температур, нижчих A_{c1} . Відпускна крихкість II роду зумовлена концентрацією атомів небажаних елементів в шарах поблизу границь зерен. Внаслідок цього блокується рух дислокацій, і руйнування здійснюється по границях зерен. Цьому сприяють Cr, Mn, P (0,001 %). Відпускна крихкість II роду «зворотна», оскільки за повторного нагрівання і повільного охолодження тих самих сталей у небезпечному інтервалі температур цей дефект може повторитися. Таку крихкість можна знизити швидким охолодженням сталі після відпуску, відповідною температурою відпуску (вищою температурою і меншою тривалістю відпуску), а також застосуванням сталі відповідного хімічного складу.

20. Що таке старіння сталі?

Після гартування або швидкого охолодження сталі від температури відпуску у твердому розчині (в α -залізі) залишається надлишкова кількість вуглецю та азоту. Нерівноважна структура з мікрооб'ємами, пересиченими цими елементами, утворюється також після холодної пластичної деформації сталі.

Старіння - термічна обробка сталі з пересиченим твердим розчином для отримання рівноважнішого стану. Це процес зміни властивостей внаслідок виділення надлишкового вуглецю (азоту) у вигляді дисперсних скупчень карбідів або нітридів. Старіння здійснюють нагріванням до певної температури, витримують при цій температурі й охолоджують. Старіння сприяє підвищенню твердості й міцності, зниженню пластичності та ударної в'язкості, зменшенню внутрішніх напружень. Старіння буває *природним* (за кімнатної температури) і *штучним* (за підвищеної температури). Старіння сталі після термічної обробки називають *термічним старінням*, а після холодної пластичної деформації - *деформаційним старінням*. Штучне старіння здійснюють при 200-300°C, тривалість витримувannya залежить від хімічного складу сталі.

Якщо під час експлуатації сталі можливі її нагрівання, коагуляція фаз, що виділилися, і зниження міцності, то при старінні намагаються отримати такий рівень властивостей, який буде стабільним за таких умов експлуатації. Таке старіння називають *стабілізацією*.

21. Що таке стабілізація мартенситу?

Після гартування і низькотемпературного відпуску в сталі з підвищеним вмістом вуглецю протягом тривалого часу відбуваються подальші зміни структури, що призводить до зміни її властивостей. Основна причина цих змін - розпад мартенситу і перетворення залишкового аустеніту на мартенсит. Негативний вплив залишкового аустеніту усувають обробкою холодом, а стабілізацію мартенситу здійснюють за допомогою тривалого низького відпуску. Температура стабілізації вуглецевої й низьколегованої сталі - 120°C, тривалість нагрівання - 200 годин; температура стабілізації високолегованої сталі - 160°C; тривалість витримувannya - до 500 годин.

22. Що таке хіміко-термічна обробка?

Хіміко-термічна обробка (ХТО) - технологічний процес, який об'єднує операції термічного і хімічного впливу з метою цілеспрямованої зміни складу, структури і властивостей поверхневого шару сталі. Зміна хімічного складу поверхневого шару сталевих виробів досягається у спосіб його дифузійного насичення відповідним елементом (C, N, Al, Cr, Si, B тощо) в атомарному стані з оточуючого середовища при високій температурі. Основні параметри ХТО - температура і тривалість насичення; основні процеси - дисоціація, адсорбція, дифузія.

Дисоціація - отримання насичуючого елемента в активному, атомарному стані. Наприклад: $CH_4 \leftrightarrow C + 2H_2$; $2NH_3 \leftrightarrow 2N + 3H_2$ тощо. Утворення активних атомів може відбуватися у насичуючому середовищі біля поверхні або безпосередньо на поверхні металу. Кількість активних атомів, що утворюються за

одиночку часу, залежить від складу й агрегатного стану насичуючого середовища, взаємодії окремих його складових між собою, температури, тиску і складу сталі.

Адсорбція (сорбція) - складний і нестационарний процес поглинання поверхнею сталі атомів насичуючого елемента. Розрізняють два процеси, що під час ХТО накладаються один на один: фізичну (зворотну) і хімічну адсорбцію (хемосорбцію). Фізична призводить лише до зчеплення адсорбованих атомів з поверхнею сталі завдяки дії ван-дер-ваальсових сил притягання. Для неї характерна легка зворотність процесу адсорбції (десорбція). Під час хемосорбції відбувається взаємодія між атомами насичуючого елемента і атомами поверхні металу, яка за характером та інтенсивністю наближається до хімічної. Адсорбція - це екзотермічний процес, що призводить до зменшення вільної енергії. Адсорбція починається на ділянках поверхні з максимальною енергією. При збільшенні тиску насичуючого середовища кількість адсорбованих атомів збільшується.

Дифузія - це переміщення адсорбованих (захоплених поверхнею) атомів у кристалічній ґратці насичуваного металу вглиб виробу. Дифузія можлива за розчинності насичуючого елемента в металі, що підлягає обробці, й підвищення температури.

Вказані основні процеси ХТО (дисоціація, адсорбція, дифузія) пов'язані між собою і впливають на кінетику, фазовий склад, структуру і властивості поверхневого шару. Швидкості цих процесів повинні бути узгоджені. Для адсорбції і дифузії потрібно, щоб насичуючий елемент взаємодівав з основним металом, утворюючи твердий розчин або хімічну сполуку. Якщо основний метал і насичуючий елемент утворюють механічну суміш, ХТО неможлива.

Речовини, у середовищі яких відбувається насичення (дифузанти або карбюризатори) бувають тверді, рідкі й газоподібні. Тому процеси ХТО відповідно називають цементацією у твердому карбюризаторі, рідким ціануванням або *газовою цементацією*. У більшості випадків ХТО доповнюють зміцнюючою термічною обробкою.

Термічна обробка

Хіміко-термічна обробка широко застосовується у машинобудуванні. Вона підвищує твердість поверхні виробів, їхню стійкість проти спрацювання, кавітаційну й корозійну стійкість, забезпечує підвищення надійності й ресурсу роботи деталей.

Види хіміко-термічної обробки класифікують відповідно до певного насичуючого елемента. Серед основних видів ХТО відзначимо дифузійне

насичення вуглецем - цементация, азотом - азотування, азотом і вуглецем одночасно - ціанування і нітроцементация, дифузійну металізацію алюмінієм - алітування, хромом - хромування, бором - борування. Залежно від стану насичуючого середовища (твердий, рідкий, газоподібний) розрізняють процеси газової цементации або газового азотування, нітроцементации, цементации у твердому карбюризаторі, рідкого ціанування, борування.

Цементация - це поверхневе насичення маловуглецевої (0,1-0,25 % C) сталі вуглецем з метою одержання високої твердості поверхні й в'язкої серцевини виробів. Насичуючі суміші, багаті на вуглець, можуть бути у твердому, рідкому і газоподібному стані.

Для цементации у твердому стані використовують суміші деревного вугілля у вигляді зерен 3-7 мм (75-90 %) із вуглекислими солями (10-25 %) барію або натрію. Процес цементации деталі відбувається в засипці карбюризатора в закритому (герметизованому) об'ємі при нагріванні вище 900°C протягом кількох годин. Присутність малої кількості кисню сприяє утворенню окису вуглецю $2C + O_2 = 2CO$, який, контактуючи із залізом, розпадається з утворенням CO_2 і атомарного вуглецю. Вуглекислі солі активізують карбюризатор, збагачують насичуючу атмосферу окисом вуглецю:

23. Як класифікують основні види хіміко-термічної обробки?

24. Чим характеризується процес цементации?



Цей вид цементації застосовують не часто.

Для цементації в рідкому стані використовують розплави солей (наприклад, NaCN , Na_2CO_3 , KCl , BaCl_2 , SiC), у які при температурі 930-950°C занурюють деталь, що підлягає обробці. Насичення сталі вуглецем у розплавленій суміші солей відбувається за рахунок виділення атомарного вуглецю.

Найпоширеніший спосіб газової цементації - з використанням метану CH_4 , пропану C_3H_8 , окису вуглецю CO тощо - зводиться він переважно до двох реакцій:



Основними карбюризаторами газової цементації є природний газ, світильний і генераторний газ, отримані під час крекінгу нафти тощо. Процес здійснюють за температури 900-950°C, у 2-3 рази скорочується час на вуглецювання, збільшуються можливості контролю і регулювання процесу.

За глибину цементації умовно беруть відстань від поверхні деталі до половини зони, у структурі якої спостерігається приблизно однакова кількість перліту і фериту (1-2 мм).

Цементацію здійснюють за температур, вищих $\text{A}_{\text{с}_3}$, оскільки в α -залізі вуглець майже не розчиняється. Зазвичай температура цементації - 900-950°C. Проте її підвищення до 970°C і вище призводить до збільшення глибини цементованого шару.

Тривалість насичення в основному визначає товщину дифузійного шару. За використання твердого карбюризатора кожна година насичення збільшує глибину цементації на 0,1 мм. При цементації в соляному розчині або газовому середовищі бажана глибина цементації досягається ще швидше, завдяки підвищеній температурі процесу.

Вміст вуглецю в поверхневому шарі для даної температури насичення визначає межа його розчинності в аустеніті (див. рис. 3.1 - лінія SE діаграми залізо-вуглець). Вищим температу-

Термічна обробка

рідим цементатції відповідає більша насиченість вуглецем цементованого шару. Рекомендований середній вміст вуглецю в шарі повинен відповідати складу евтектоїдної сталі - 0,85 %, а у зовнішньому шарі - не перевищувати 1,1 - 1,2 %. У разі перевищення цієї кількості вуглецю, утворюється сітка вторинного цементиту, що призводить до окрихчення цементованої сталі.

Структура цементованої сталі залежить від вмісту вуглецю, швидкості охолодження після цементатції та подальшої термічної обробки. За повільного охолодження структуру визначає плавне зниження вмісту вуглецю. Так, біля поверхні (0,8-1,1 % C) цементований шар має перлітно-цементитну структуру (так звану заевтектоїдну зону); далі - евтектоїдну зону з вмістом вуглецю близько 0,8 % з перлітною структурою і, нарешті, доевтектоїдну зону (вміст вуглецю становить менше 0,7 % C) з ферито-перлітною структурою, яка поступово переходить у вихідну структуру сталі.

Після цементатції вироби піддають гартуванню і низькому відпуску для надання їм високої поверхневої твердості та стійкості проти спрацювання, а також для підвищення ударної в'язкості серцевини. Така термічна обробка забезпечує утворення структури дисперсного високовуглецевого мартенситу поверхні, подрібнення зерна серцевини і зняття внутрішніх напружень. Твердість поверхні після проведеної обробки має становити 58-62 HRC, а серцевини 20-35 HRC залежно від хімічного складу вихідної сталі.

Азотування - процес поверх-

невого насичення сталевих виробів азотом у газоподібному або рідкому середовищі. Вперше азотування здійснив Н. П. Чижевський у 1913 р. Діапазон температур азотування від 470 до 600°C.

Відповідно до діаграми Fe-N залізо і азот утворюють кілька фаз: α -фаза - азотистий ферит (вміст азоту при 20°C близько 0,015 %, при 591°C - 0,1 %); γ -фаза - твердий розчин на основі нітриду заліза Fe_4N (5,6-5,95 % N_2); ϵ -фаза - твердий розчин на основі

25. Які різновиди азотування існують та які особливості цього процесу?

нітриду заліза Fe_2N (8-11,2 % N_2); γ -фаза - твердий розчин азоту в γ -залізі (існує вище температури евтектоїдного перетворення 591°C).

Отримані азотуванням шари складаються з поверхневої нітридної зони і дифузійного підшару (зони внутрішнього азотування), які забезпечують широкий діапазон фізико-механічних властивостей азотованих виробів.

Для рідкого азотування використовують розплави ціаністих солей натрію і калію, а для газового - різні насичуючі середовища (аміак, суміші аміаку та азоту, аміаку і природного газу або пропану, ендогазу, екзогазу тощо). Присутність у сумішах вуглецю призводить до утворення на поверхні також карбонітридних фаз на зразок $\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})$. Для азотування вироби завантажують у герметичні печі, до яких подають насичуючу суміш з NH_3 , що дисоціює під час нагрівання.

За умовами роботи виробів розрізняють азотування для підвищення поверхневої твердості, стійкості проти спрацювання, втомної міцності й азотування для підвищення корозійної стійкості. Азотування для підвищення поверхневої твердості здійснюють при $500\text{-}520^\circ\text{C}$ протягом 24-90 годин. Швидкість насичення дорівнює 0,01 мм за годину. Вміст азоту в поверхневому шарі - близько 10-12 %, глибина насичення 0,3-0,6 мм, твердість 1000-1200 HV. За вищих температур азотування прискорюється, але твердість шару знижується. Тому у певних випадках азотування здійснюють спочатку при знижених температурах, а згодом температуру підвищують до $560\text{-}600^\circ\text{C}$. Такі тонкі шари мають більшу твердість, порівняно з грубими шарами тривалого азотування за тих самих температур.

Азотування для підвищення корозійної стійкості здійснюють за температури $650\text{-}700^\circ\text{C}$. Завдяки підвищеній швидкості дифузії, тривалість процесу скорочується до кількох годин. На поверхні виробів утворюється тонкий шар (0,01-0,03 мм) ϵ -фази високої корозійної стійкості. Для азотування з метою підвищення корозійної стійкості використовують будь-які сталі, навіть прості вуглецеві.

Термічна обробка

При азотуванні для підвищення твердості та стійкості проти спрацювання використовують спеціальні сталі (нітралої), до складу яких входять елементи, що утворюють термічно стійкі нітриди (CrN , MoN , AlN), наприклад сталь 38ХМЮА. Для підвищення втомної міцності азотують звичайні леговані сталі з нітридоутворюючими елементами (хромонікелеві конструкційні тощо).

Азотування здійснюють на готових виробах, що пройшли остаточну термічну обробку. Оптимальною структурою для азотування є сорбіт, який зберігається в серцевині й після насичення поверхні, забезпечуючи її підвищену міцність і в'язкість. Тому деталі перед азотуванням піддають зміцнюючій термічній обробці - гартуванню з високим відпуском.

Тривалий час вважали, що високу активність аміаку при азотуванні визначає утворення атомарного азоту при дисоціації. Сьогодні доведено, що дисоціація аміаку є йонним процесом, що супроводжується утворенням у робочому просторі печі негативно заряджених йонів. Тому застосування при азотуванні електростатичних полів, іскрового або тліючого розрядів значно інтенсифікує цей процес і має широкі перспективи.

Ціануванням і нітроцементациєю називають одночасне насичення поверхневих шарів виробів вуглецем і азотом. Такі дифузійні шари мають високу твердість і опір спрацюванню, підвищену втомну міцність і корозійну стійкість. Спільна дифузія вуглецю і азоту відбувається швидше, ніж кожного з цих елементів окремо. Тривалість процесу 0,5-2 години.

Ціанування може здійснюватися в рідкому або твердому середовищі. Розрізняють низькотемпературне ($540-560^{\circ}\text{C}$) ціанування, середньотемпературне ($820-860^{\circ}\text{C}$) і високотемпературне ($920-960^{\circ}\text{C}$). За підвищених температур поверхня насичується

26. Які різновиди і особливості процесів ціанування і нітроцементациї?

вуглецем більше, ніж азотом, тобто процес наближається до цементації. Низькотемпературному ціануванню піддають деталі, що вже термічно оброблювалися. Після високотемпературного насичення вироби піддають гартуванню з низьким відпуском. Поверхневий шар після такого ціанування містить 0,8-1,2 % C і 0,2-0,3 % N.

Низькотемпературне (тверде) ціанування здійснюють подібно до цементації, але карбюризатор містить також ціаністі солі - $K_4Fe(CN)_6$, KCN, NaCN. Зміцнений шар складається з тонкого (10-15 мкм) поверхневого шару карбонітридів $Fe_3(CN)$, під ним розташовується твердий шар (600-1000 HV) азотистого фериту завтовшки 0,2-0,5 мм. Таку обробку застосовують для середньовуглецевих сталей і для інструменту з швидкорізальної сталі. За продуктивністю тверде ціанування значно поступається рідкому або газовому і не набуло широкого поширення.

Високотемпературне (рідке) ціанування здійснюють для підвищення властивостей виробів з середньо- і низьковуглецевих, а також легованих сталей. Карбюризаторами служать суміші розплавлених солей, наприклад: 40 % NaCN + 40 % NaCl + 20 % Na_2CO_3 для температур 820-850°C або 6 % NaCN + 80 % $BaCl_2$ + 14 % NaCl для температур 900-950°C. Основний компонент ціанідних ванн - група CN. Збільшення вмісту CN сприяє підвищенню концентрації вуглецю і азоту в поверхневому шарі виробу, глибина якого залежить від температури та тривалості процесу. Залежно від температури та хімічного складу ванни отримують різні структури і ступінь насичення вуглецем і азотом.

Негативним явищем ціанування є отруйність ціанових солей і висока вартість процесу. Тому найбільшого поширення набули процеси насичення вуглецем і азотом у газовому середовищі - *нітроцементация*. Розрізняють високотемпературну (800-950 °C) і низькотемпературну (560-580 C) нітроцементацию. Дифузійне насичення при цьому здійснюють у більшості випадків в ендотермічній атмосфері, до якої додають аміак. Глибина нітроцементации залежить від температури і тривалості процесу.

Іноді високотемпературну нітроцементацию називають карбонітруванням, а низькотемпературну - нікотруванням. Порівняно з газовою цементациєю нітроцементация забезпечує меншу деформацію і короблення виробів, підвищені корозійну стійкість і стійкість проти спрацювання.

Дифузійна металізація - це процес хіміко-термічної обробки, під час якої відбувається насичення поверхні сталевих виробів різними металами. Процес насичення алюмінієм називають алітуванням, хромом - хромуванням, бором - боруванням, кремнієм - силіціюванням тощо.

27. Які різновиди і особливості процесу дифузійної металізації?

Дифузійна металізація, як й інші процеси ХТО, може здійснюватися у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Металізаторами твердої дифузійної металізації є 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 металевою поверхнею дисоціює з утворенням вільних атомів.

Рідку металізацію здійснюють, занурюючи вироби у розплавлений метал (наприклад, алюміній).

Газова металізація відбувається у газових середовищах (хлоридах різних металів).

Оскільки метали на відміну від вуглецю і азоту утворюють із залізом розчини заміщення, дифузія йде значно повільніше - однакових температурно-часових умов процесу.

Мала швидкість дифузії не сприяє широкому поширенню дифузійної металізації у зв'язку з тривалістю процесу і необхідністю використання високих температур ($1000-1200^\circ\text{C}$). Проте дифузійна металізація дає змогу одержати вироби зі звичайних

вуглецевих сталей з високою жаростійкістю (хромування, алітування, силіціювання) до температур 1000-1100°C або високою твердістю до 2000 HV (борування) і стійкістю проти спрацювання.

Алюмініюванням (алітуванням) підвищують жаростійкість і опір корозії в морській воді. Насичення алюмінієм відбувається при температурі 700-1100°C у порошковому середовищі, що містить Al, або у розплаві Al. Основна структура дифузійного шару - твердий розчин алюмінію в α -залізі; на поверхні можливе утворення інтерметалідних фаз: Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 .

Хромування здійснюють при 900-1400°C у порошковому, рідкому або газовому середовищі, що містить хром. Застосовують для підвищення жаростійкості (до 800°C), опору спрацюванню й підвищення корозійної стійкості. Основна структура шару - твердий розчин хрому в залізі; на поверхні - карбіди $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ і $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$; під ними евтектоїд (α -розчин + $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$).

Борування використовують для підвищення стійкості проти спрацювання виробів, що працюють при підвищених температурах і в агресивних середовищах. Насичення поверхні бором і утворення боридів відбувається при нагріванні виробів до 900-1000°C у середовищах, що містять бор (2-5 годин), або при електролізному боруванні в розплаві. Основна структура зміцненого шару - бориди FeB і Fe_2B під шаром боридів α -твердий розчин бору в залізі.

28. Які різновиди і особливості термомеханічної обробки?

Термомеханічна обробка (ТМО) передбачає комбінований вплив на метал пластичної деформації й термічну обробку в різній технологічній послідовності для отримання потрібної (оптимальної) структури і комплексу високих механічних властивостей.

Перевагами ТМО вважають можливість істотного підвищення міцності й ударної в'язкості (у 1,5-2 рази) при незначному зниженні пластичності порівняно з властивостями аналогічної сталі після гартування і низького відпуску. Сутність ТМО

Термічна обробка

зводиться до того, що перед гартуванням здійснюють пластичну деформацію високотемпературної фази, внаслідок якої під час гартування фазове перетворення відбувається в наклепаному (нагартованому) або частково рекристалізованому стані. Залежно від температури деформації розрізняють високотемпературну і низькотемпературну термомеханічну обробку.

Підвищення міцності після ТМО пояснюють подрібненням зерен аустеніту внаслідок його деформації, подрібненням блоків і підвищенням густини дислокацій у 3-4 рази порівняно зі звичайним гартуванням. Наступне гартування такого деформованого аустеніту зумовлює утворення дрібних пластин мартенситу і зменшення напружень II роду. Це позитивно впливає на пластичність і в'язкість. ТМО можна застосовувати для зміцнення не лише конструкційних сталей, а й інших сплавів (титанових, жароміцних тощо).

Високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО) полягає у нагріванні сталі до температур, вищих A_{c3} , витримуванні при цих температурах, пластичному деформуванні при температурі вище температури рекристалізації (T_p) і охолодженні (гартуванні) зі швидкістю, що перевищує критичну (рис. 4.10,а). Після ВТМО вироби піддають низькому відпуску. Підвищення властивостей після ВТМО пояснюють тим, що мартенситне перетворення відбувається в сталі з певною субструктурою внаслідок деформації. Так, після ВТМО сталі 50ХН4М (нагрівання до 1050-1100°C, деформація на 25-30 % при 900-950°C, гартування, низький відпуск) одержують $\sigma_b = 2600-2700$ МПа, $\delta = 8-10$ %, $KCU = 56$ Дж/см². ВТМО можна піддавати будь-які метали і сплави, проте найбільший ефект спостерігається у сплавах з мартенситним перетворенням.

Низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО) складається з нагрівання сталі до температури вище A_{c3} (1100-1150°C); охолодження до T_p - температури стабільності аустеніту (нижче A_1 і вище M_n - 450-550°C; пластичної деформації при цій температурі на 75-95 %; охолодження (гартування) зі швидкістю,

що забезпечує утворення мартенситу; низького відпуску при 150-200°C (рис. 4.10,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 деформації піддають аустеніт у метастабільному стані, то доцільно так обробляти сталі зі значною стабільністю аустеніту в інтервалі температур деформування (у надмартенситній області). Слід враховувати також, що при температурах 450-550°C опір деформації переохолодженого аустеніту досить значний, і проведення НТМО потребує спеціального обладнання. Іноді обробку за режимом НТМО називають *аусформінгом*.



Рис. 4.10. Температурно-часова схема режимів термомеханічної обробки: а - ВТМО, б - НТМО, в - ізоформінг

Ізоформінг - це термомеханічна обробка, за якої сталі нагрівають до температур, вищих A_{c3} , охолоджують до температури максимуму на кривій ізотермічного розпаду аустеніту (рис. 4.10,в) і деформують не тільки перед початком розпаду, а й під час усього процесу перетворення метастабільного аустеніту на перліт.

За всіх випадків при ТМО перетворення відбувається після деформації. Проте існує вид обробки, за якого операції деформації та перетворення здійснюють у зворотному порядку - спочатку перетворення, а потім деформація (нагартування). Цей вид обробки називається механіко-термічною обробкою (МТО).

Термічна обробка

Така обробка мартенситу після деформуванням на 3-5 % гартування дає змогу дозволяє підвищити його міцність на 10-20 % (марформінг).

Термічна обробка на тонкопластинчастий перліт (троостит або сорбіт) з наступною деформацією має назву патентування. Це один з найстаріших способів ізотермічного гартування, розроблений ще до того, як була визначена сутність ізотермічного розпаду аустеніту. Метою патентування є підготовка структури до наступного холодного волочіння з великим сумарним обтискуванням. Потрібну структуру отримують нагріванням сталі на 80-100°C вище A_{c3} , швидким охолодженням до температури розпаду аустеніту (450-550°C) і остаточним охолодженням на повітрі. Патентування здійснюють на спеціальному обладнанні. Використовуючи цей вид обробки для високовуглецевих сталей (1 % C) з високим ступенем деформації (понад 95 %), можна досягти найвищої міцності для промислових виробів (близько 4500 МПа). Проте така міцність (майже третина від теоретичної) можлива лише при виготовленні тонкого дроту.

Термічна обробка чавунів сприяє зменшенню внутрішніх напружень у виливках, отриманню стабільної структури і розмірів, підвищенню

29. У чому полягають особливості термічної обробки чавунів?

твердості та стійкості проти спрацювання у спосіб гартування й відпуску, надає чавуну (білому) підвищеної міцності-і пластичності відпалюванням.

Специфічними процесами термічної обробки чавунів є: графітизація, тобто розкладання цементиту для зменшення кількості зв'язаного вуглецю; розчинення графіту і збагачення вуглецем аустеніту, що зумовлює збільшення кількості перліту у структурі чавуну.

Однією з особливостей термічної обробки чавуну на відміну від сталі є необхідність більш строгого врахування структурного стану і властивостей вихідного чавуну.

Нагрівати і охолоджувати вироби з чавуну слід з такою швидкістю, яка б запобігала утворенню тріщин і деформацій. Для виробів великого перерізу і складної форми рекомендують зменшувати швидкості нагрівання і охолодження. Особливо небажане підвищення швидкості в інтервалі температур пружного стану (від кімнатної до 500°C). Відзначимо також, що мала швидкість нагрівання сприяє графітизації цементиту. На практиці граничні швидкості нагрівання і охолодження визначають експериментально з урахуванням хімічного складу, структури чавуну, розмірів і конфігурацій виробів та існуючого термічного обладнання.

Тривалість нагрівання (витримування) виробів слід визначати також з урахуванням дифузійних процесів і структурних перетворень в області високих температур. Тривалість витримування виробів після досягнення потрібної температури має бути мінімально достатньою для протікання перетворень. Надмірна тривалість нагріву призводить до розпаду перліту і погіршення механічних властивостей чавуну.

30. Які основні режими застосовують при термічній обробці сірого чавуну?

Виливки з сірого чавуну, структура якого складається з ледебуриду, перліту, вторинного цементиту і графіту, піддають термічній обробці для забезпечення потрібного комплексу властивостей. Основними видами

обробки є: відпал, нормалізація, гартування (об'ємне і поверхневе), відпуск.

Відпал низькотемпературний ($500-600^{\circ}\text{C}$), або *штучне старіння* протягом 1-8 годин, здійснюють повільним нагріванням ($70-100^{\circ}\text{C}/\text{год.}$) і повільним охолодженням з піччю ($20-50^{\circ}\text{C}/\text{год.}$) до 250°C . Далі виливки охолоджують на повітрі. Використовують для зменшення або зняття напружень, запобігання деформації й тріщиноутворень під час механічної обробки та експлуатації.

Термічна обробка

Відпал середньотемпературний (680-750 °C) графітизуючий застосовують для зменшення твердості, підвищення пластичності й ударної в'язкості, поліпшення оброблюваності. Тривалість відпалювання - 1-4 години залежно від потрібної структури. Для складних виробів рекомендують повільне нагрівання (до 550°C) і охолодження (до 250°C).

Відпал високотемпературний (850-950°C), графітизуючий (0,5-5,0 години) використовують для зменшення твердості та поліпшення оброблюваності. Повільний нагрів і охолодження до 250°C з піччю, далі - на повітрі.

Нормалізація від температури 850-950°C застосовується для підвищення твердості, міцності та стійкості проти спрацювання.

Гартування від температури 850-930°C у воді або маслі з витримуванням при нагріванні 0,5-3,0 години застосовують для підвищення твердості до 500 HB, міцності й опору проти зношування.

Ізотермічне гартування виробів з чавуну переважає традиційні види у підвищенні твердості та стійкості проти спрацювання, проте ускладнює обробку різанням. Ізотермічне гартування чавуну зводиться до аустенітизації та наступного ізотермічного розпаду аустеніту в проміжній області C-подібної діаграми з утворенням переважно структури бейніту. Наявність у бейніті залишкового аустеніту зумовлює можливість підвищення механічних властивостей наступною обробкою холодом. Ізотермічне гартування чавуну складається з двох етапів: 1 - аустенітизація при 820-900°C, витримування при цій температурі 0,2-1,5 години; 2 - переохолодження аустеніту з наступним його розпадом в ізотермічних умовах за температур в інтервалах від 250-300°C до 450-500 °C.

Поверхнєве гартування здійснюють у спосіб швидкого нагрівання поверхні чавуну до температури 840-950°C газовим полум'ям, струмами високої частоти тощо і охолодженням у воді, маслі та інших середовищах. Така обробка забезпечує підвищення твердості до 55 HRC і стійкості проти спрацювання.

Відпуск застосовують для усунення термічних напружень, підвищення в'язкості і пластичності. Температура відпуску 250-600°C, тривалість - 1-3 години залежно від потрібної твердості.

31. За якими режимами здійснюють термічну обробку білого чавуну?

Термічну обробку білого чавуну проводять для одержання ковкого чавуну з високою міцністю і пластичністю спеціальним графітизуючим відпалюванням (томлінням). Для відпалу на ковкий чавун використовують білий чавун

з досить вузьким інтервалом вмісту легуючих елементів: 2,4-2,8 % C; 0,8-1,4 % Si; < 1 % Mn; < 0,1 % S; < 0,1 % P.

У процесі графітизуючого 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 світлий, і його називають білосердечним.

Існують два способи відпалювання на ковкий чавун:

- графітизуючий відпал у нейтральному середовищі з перетворенням цементиту на ферит і графіт (вуглець відпалу);
- відпал в окислювальному середовищі, заснований на випалюванні вуглецю (сьогодні майже не застосовується).

Сучасний процес графітизуючого відпалу (рис. 4.11) складається з двох стадій. Перша стадія - рівномірне нагрівання чавуну до 950-1000°C. За цієї температури відбувається графітизація надлишкового цементиту (10-15 годин), потім деталь охолоджують з піччю зі швидкістю 70-100°C/год. до 740°C. Друга стадія - ізотермічна обробка при цій температурі (триває протягом майже 30 годин), після чого чавун охолоджують на повітрі. На цій стадії графітизується цементит перліту. Остаточна структура чавуну складається з фериту та гнізд пластівчастого графіту.

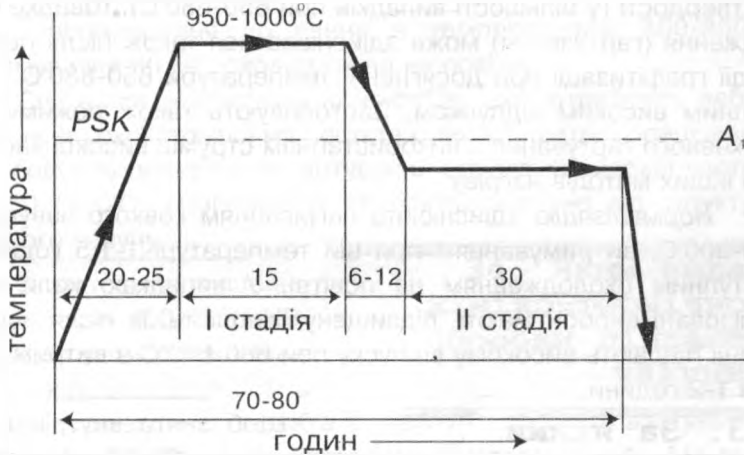


Рис. 4.11. Графік режиму відпалу білого чавуну для отримання ковкого чавуну

Перлітний ковкий чавун отримують за неповного відпалу: після першої стадії графітизації при 950-1000°C чавун охолоджується з піччю, друга стадія графітизації не проводиться. Для підвищення в'язкості перлітний чавун піддають сфероїдизації при температурі 700-750°C, за якої отримують структуру зернистого перліту.

Для прискорення графітизуючого відпалу розроблено метод, що передбачає гартування білого чавуну перед графітизацією. Дрібнозерниста структура і внутрішні напруження створюють численні центри кристалізації графіту. Це прискорює першу та другу стадії графітизації і скорочує процес до 10-15 годин. Характерна особливість чавуну після такого прискореного відпалу - дрібні зерна фериту та графіт.

Щоб підвищити міцність і стійкість проти спрацювання, ковкі чавуни піддають гартуванню з відпуском або нормалізації.

32. За якими режимами здійснюють термічну обробку ковкого чавуну?

Гартування здійснюють від температур 850-900°C охолодженням виливків у маслі або воді, відпуск залежно від потріб-

ної твердості (у більшості випадків при 650-680°C). Швидке охолодження (гартування) може здійснюватися також після першої стадії графітизації при досягненні температури 850-880°C з наступним високим відпуском. Застосовують також режими поверхневого гартування з використанням струмів високої частоти або інших методів нагріву.

Нормалізацію здійснюють нагріванням ковкого чавуну до 850-900°C, витримуванням при цій температурі 1-1,5 години з наступним охолодженням на повітрі. У випадках, коли нормалізовані вироби мають підвищену твердість, їх після нормалізації піддають високому відпуску при 680-680°C з витримуванням 1-2 години.

33. За якими режимами здійснюють термічну обробку високоміцного чавуну?

Щоб зняти внутрішні напруження (на 80-90 %) виливків складної конфігурації, їх піддають повільному нагріву до 500°C, витримують 2-3 години і охолоджують з піччю до 200°C.

Для полегшення такої операції механічної обробки, як різання, виливки із структурно-вільним цементитом піддають графітуючому відпалу при 900-950°C протягом 2-5 годин з наступним охолодженням у печі.

З метою підвищення порогу міцності й стійкості проти спрацювання виливків відповідального призначення (колінчастих валів, колес) використовують обробку за режимом нормалізації з відпуском. Температура нагрівання становить 900-950°C, тривалість процесу - 2-3 години з подальшим охолодженням на повітрі. Відпуск здійснюють за режимом: нагрівання до 550-600°C, охолодження з піччю.

Для підвищення твердості та стійкості проти спрацювання використовують (досить обмежено через можливість розтріскування) гартування в маслі від 900°C. Значне підвищення міцності й стійкості проти спрацювання забезпечує ізотермічне гартування за режимом: нагрівання до 850-880°C, витримування 30-

Термічна обробка

45 хв., перенесення до ванни з температурою 300-350°C, витримання 60 хв., охолодження на повітрі.

Для високонавантажених виробів, що потребують забезпечення високої втомної міцності та стійкості проти спрацювання застосовують поверхнєве гартування струмами високої частоти від 950-1100°C. Температуру обирають залежно від структури вихідного чавуну.

З метою підвищення твердості до 600-1000 HB, стійкості проти спрацювання та корозійної стійкості в газовому середовищі виробів з чавуну їх піддають азотуванню. Для цього використовують сірі чавуни, леговані Cr, Ni, Mo та іншими нітридоутворюючими елементами, а також високоміцний чавун.

34. Яким видам хіміко-термічної обробки піддають чавуни?

Азотування здійснюють при температурі 550-580°C. Тривалість процесу (50-70 годин) залежить від потрібної глибини азотованого шару. Охолоджують з піччю. Для азотування рекомендують використовувати сірі леговані чавуни з відбілом. Такий чавун попередньо піддають відпалу для розпаду цементиту при 950-1000°C протягом 4-12 годин. Щоб надати металевій основі чавуну високих механічних властивостей, після відпалу деталі з чавуну термічно поліпшують гартуванням від 800-850° у маслі з короткочасним відпуском при 600°C.

Перспективною обробкою чавунів є процес азотування у тліючому розряді. Дифузійний шар, що утворюється при цьому, не крихкий і добре скріплений з дифузійним підшаром. Азотування в тліючому розряді значно підвищує стійкість за умов тертя й зношування, а також втомну міцність при знакозмінному вигині.

Алітування (насичення алюмінієм) виробів з чавуну здійснюють з метою підвищення їхньої жаротривкості. Застосовують такі самі способи, як за обробки сталі. Найпоширеним є алітування чавуну в порошкових сумішах фероалюмінію і окису алю-

мінію при 950-1050°C (2-6 годин) після повільного нагрівання до 500°C. Охолодження відбувається з піччю або на повітрі.

За подібним режимом здійснюють *хромування* у твердому (10-12 годин) або газовому (5 годин) середовищі. Воно забезпечує твердість поверхні 1600 НВ, підвищення жаротривкості й антикорозійних властивостей чавунів.

Сіліціювання виробів з чавуну для підвищення їхньої кислотостійкості й твердості здійснюють у твердих або газових насичуючих середовищах при температурі 1000-1100°C. Для отримання шару товщиною 0,5-0,8 мм на виливках ковкого чавуну потрібна тривалість насичення 20-25 годин. За цей же час на виливках з сірого чавуну утворюється шар 0,1 мм. Найкращі результати спостерігаються при сіліціюванні ковкого чавуну, задовільні - сірого.

Сульфідуювання виливків сірого чавуну реалізують повільним нагріванням в середовищах, що містять сірку до температури 550-600°C. Для отримання шару товщиною 0,3 мм необхідна тривалість насичення - 3 години. Охолоджують вироби після ХТО на повітрі. Процес сульфідуювання полегшує механічну обробку чавуну різанням.

35. Які основні перетворення відбуваються при термічній обробці кольорових сплавів?

При термічній обробці кольорових сплавів у промисловості часто використовують *відпал* без перекристалізації (першого роду). Проте досить широко застосовують і пом'якшувачий відпал, особливо для обробки термічно зміц-

нюваних сплавів алюмінію (на зразок дуралюмінію, авіалю тощо). Для зазначених сплавів алюмінію послуговуються скороченим (неповним) пом'якшувачим відпалом, який застосовують також для обробки двофазних латуней та інших сплавів.

При термічній обробці сплавів алюмінію, магнію, нікелю, міді користуються *гартуванням* без поліморфного перетворення. Воно засноване на зміні розчинності фаз у твердому розчині при

Термічна обробка

нагріванні до підвищених температур. Зміцнююча термічна обробка кольорових сплавів гартуванням без поліморфного перетворення (рис. 4.12) складається з нагрівання до температури гартування $T_{\text{гарт}}$, розчинення β -фази у матричній α -фазі, витримання при $T_{\text{гарт}}$ і швидкого охолодження. Внаслідок цього у твердому розчині фіксується елемент B у кількості, що відповідає температурі T_0 (точка n). Такий твердий розчин є пересиченим при кімнатній температурі, оскільки його рівноважна концентрація відповідає точці b . Внаслідок природного або штучного старіння з матричної α -фази виділяється елемент B у вигляді дисперсної хімічної сполуки, і сплав зміцнюється.

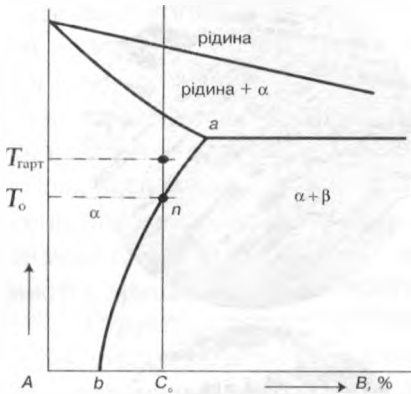


Рис. 4.12. Схема гартування без поліморфного перетворення

При гартуванні сплавів кольорових металів швидке охолодження не є обов'язковим. Головне, щоб при охолодженні не відбувся розпад матричного твердого розчину. Залежно від швидкості цього розпаду може змінюватися і швидкість охолодження при гартуванні. Це зумовлює застосування різних середовищ гартування (вода, спокійне повітря).

Особливі, або нетипові, структури можуть утворюватися внаслідок деяких технологічних операцій або у результаті відхилень від заданих режимів термічної обробки. До таких структур відносять аномальну структуру сталі, структури перегрітого і перепаленого металу, строкату структуру та інші (рис. 4.13).

36. Що таке особливі структури?

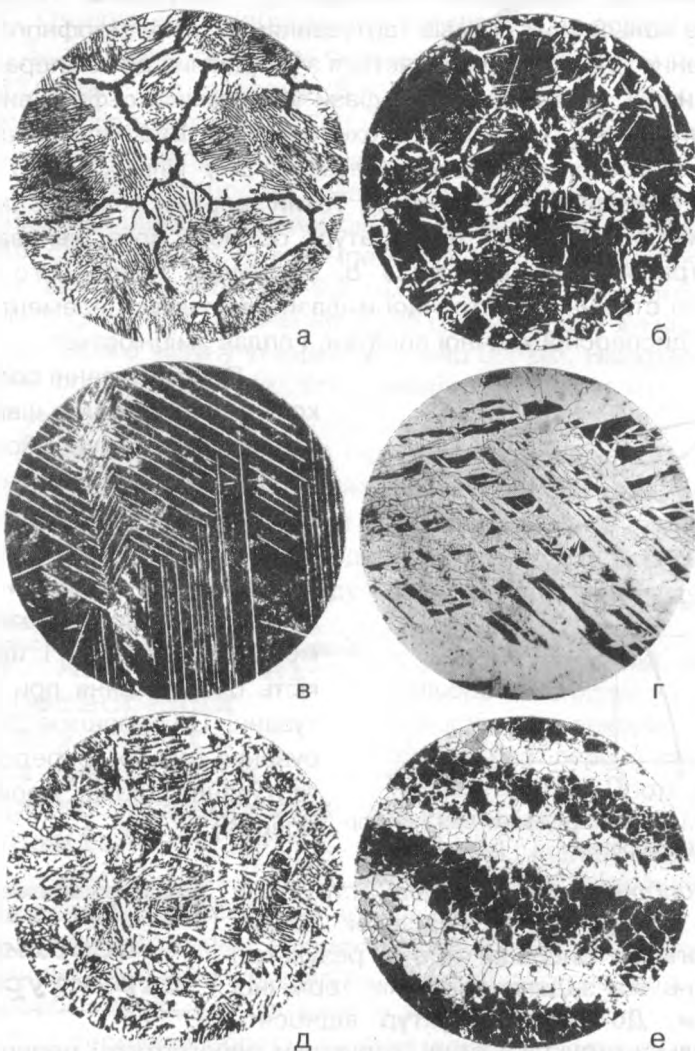


Рис. 4.13. Особливі структури сталі: а - анормальна структура цементованої сталі, $\times 300$, б - структура перегрітої доевтектоїдної сталі, $\times 150$, в - структура перегрітої заевтектоїдної сталі, $\times 150$, г, д - відманштеттова структура, $\times 100$, е - строката ферито-перлітна структура сталі, $\times 100$

Аномальна структура сталі іноді спостерігається після цементзації. Замість звичайної структури перліту, обрамленого цементитною сіткою, спостерігається вільний ферит між цементитною сіткою і перлітними колоніями. Цементитна сітка у таких випадках ширша і розірвана, перліт грубіший, карбіди у складі перліту частково коагульовані; аномальність структури пропорційна кількості вільного фериту. Така структура утворюється тоді, коли розпад аустеніту відбувається при незначному переохолодженні. Прискорене охолодження після цементзації запобігає утворенню аномальної структури.

Сталі, схильні до утворення аномальної структури, відрізняються тим, що формування ділянок структурно-вільного фериту гальмується в них відносно швидким охолодженням. Здатні до утворення аномальних структур сталі характеризуються вищими критичними швидкостями охолодження при гартуванні. Присутність кисню в сталі підвищує її схильність до утворення аномальної структури. Особливо схильна до цього кипляча сталь, заспокоєна у виливниці, внаслідок дії неметалічних вкраплень (як зародків), що сприяє перетворенню аустеніту при незначному переохолодженні. Аномальні сталі більш дрібнозерністі й менш чутливі до перегріву.

Структуру перегрітої сталі характеризує велике зерно, яке може утворюватися при підвищенні температури від заданої під час гартування (нормалізації) або відпалу. Велике зерно утворюється також у разі закінчення гарячої механічної обробки при високих температурах, після гомогенізуючого відпалу, в литих сталях і зварювальних швах.

Таку структуру характеризує також присутність закономірно розміщеного фериту (у доевтектоїдній сталі) та вторинного цементиту (у заевтектоїдній), які спостерігаються не тільки на границях вихідних аустенітних зерен, а й всередині зерен по певних кристалографічних площинах. Таку структуру називають відманштеттовою (рис. 4.13, г, д). Її характерною особливістю є те, що вона легше утворюється в сталях з малим вмістом вуг-

лецю і великим аустенітним зерном. Відманштеттова структура, що утворилася з великозернистого аустеніту, має підвищену крихкість, якої позбуваються проведенням повного відпалу.

Структура перепаленої сталі утворюється при нагріванні її до температури, що наближається до температури плавлення. Характеризується оплавленням по границях аустенітного зерна спочатку за рахунок можливих домішок (евтектик), а згодом і оплавленням основного металу в приграничних зонах. По оплавлених зонах кисень повітря швидко дифундує, утворюючи оксидні вкраплення або оболонки під час охолодження сталі, які погіршують зв'язок між зернами аустеніту, значно знижують міцність і пластичність сталі. Ці вкраплення можна спостерігати на полірованому потравленому шліфі. Перепал сталі є невиправним дефектом.

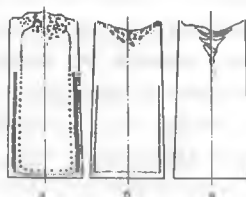
Строкаті структури пов'язані з неоднорідністю хімічного складу сталі, що виникає при твердненні або внаслідок деформації. У доевтектоїдних сталях під час гарячої деформації разом з аустенітом деформуються (витягуються вздовж течії металу) і неметалеві сульфідні вкраплення марганцю. При рекристалізації витягнуті зерна аустеніту замінюються рівновісними, а вкраплення зберігають свою витягнуту вздовж прокатування форму. У процесі охолодження сталі такі вкраплення стають підкладкою (зародком) при перетворенні аустеніту на ферит. Тому при проходженні міжкритичного інтервалу температур рівновісні феритні зерна утворюють на видовжених включеннях смуги фериту, між якими розміщуються, також у вигляді смуг (рядків), рівновісні перлітні колонії. Спостерігається чергування рядків фериту з рядками ферито-перлітної будови (рис. 4.13,е). У заевтектоїдних сталях строкатість зумовлена ліквідацією карбідів або смугастістю їхнього розподілу. На цих ділянках часто виникає карбідна сітка.

Строкатість структури викликає анізотропію властивостей сталі вздовж і поперек напрямку прокатування, передусім щодо показників ударної в'язкості.

Металеві матеріали машино- будування

5

конструкційна сталь
інструментальна сталь
механічні властивості
тверді сплави
порошкові матеріали
дюралюміній
латунь
бронза
бабіт
жароміцні сплави
композиційні сплави



Питання, висвітлені у розділі 5

1. Які основні металеві матеріали застосовуються в машинобудуванні?
2. Що таке конструкційні сталі та їхні основні властивості?
3. Які методи виплавки та рафінування застосовують для одержання конструкційних сталей?
4. Що впливає на механічні властивості та конструкційну міцність сталі?
5. Як поділяються сталі залежно від умов і ступеня розкислення?
6. Які особливості термічної обробки конструкційних сталей?
7. За якими ознаками класифікують вуглецеві конструкційні сталі?
8. Який склад і маркування автоматних сталей?
9. Як впливають легуючі елементи на властивості конструкційних сталей?
10. Які основні властивості цементованих сталей та вимоги до них?
11. Які основні властивості поліпшуваних сталей та вимоги до них?
12. Які основні властивості пружинно-ресорних сталей та вимоги до них?
13. Які вимоги ставляться до шарикопідшипникових сталей та їхні основні властивості?
14. Які сталі називають інструментальними, їх класифікація та маркування?
15. Які основні вимоги до властивостей інструментальних сталей?
16. Які сталі використовують для виготовлення різального інструменту та які особливості їхньої термічної обробки?
17. Яким вимогам повинні відповідати сталі для штамів холодного штампування, їхні склад та термічна обробка?
18. Яким вимогам повинні відповідати сталі для штамів гарячого деформування металів, їхні склад та термічна обробка?
19. Яким вимогам повинні відповідати сталі для вимірювального інструменту, їхній склад та термічна обробка?
20. Які основні властивості твердих сплавів та їхнє маркування?
21. Які особливості використання алмазів як матеріалу для виготовлення інструменту?

Питання, висвітлені у розділі 5

(продовження)

22. Які сталі та сплави належать до матеріалів з особливими властивостями?
23. Які найважливіші корозійностійкі сталі та їхні властивості?
24. Що таке жаростійкі сталі, вимоги до них та їхні основні властивості?
25. Що таке жароміцні сталі та сплави, вимоги до них та їхні основні властивості?
26. Які метали належать до тугоплавких?
27. Які сталі та сплави є стійкими проти спрацювання, вимоги до них та їхні основні властивості?
28. Які сталі та сплави належать до магнітних, їхній склад, маркування, властивості?
29. Які основні властивості сталей та сплавів з високим електроопором та де їх використовують?
30. Які сплави характеризуються особливими тепловими і пружними властивостями?
31. Які кольорові метали і сплави застосовують у машинобудуванні?
32. Які властивості сплавів алюмінію та де їх застосовують?
33. Які властивості та застосування сплавів магнію?
34. Які властивості мають сплави на основі міді та де їх застосовують у машинобудуванні?
35. Які властивості сплавів титану та де вони застосовуються?
36. Які властивості підшипникових сплавів та де їх застосовують?
37. Які властивості сплавів для припоїв?
38. Що таке легкоплавкі сплави?
39. Які особливості сплавів цинку, благородних металів та їхнє застосування?
40. Які основні властивості й застосування матеріалів, що виготовляють методами порошкової металургії?
41. Які вимоги і основні властивості композиційних матеріалів?

1. Які основні металеві матеріали застосовуються в машинобудуванні?

У техніці використовуються десятки тисяч металевих сплавів і кількість їх постійно зростає для задоволення потреб промисловості.

Неможливо охарактеризувати ці сплави за єдиною ознакою, оскільки їхні властивості та призначення різні.

Класифікуючи металеві сплави за хімічним складом, тобто визначаючи основний компонент (залізо, мідь, алюміній тощо) можливо розподілити їх на невелику кількість основних класів. Для подальшої їхньої характеристики всередині кожного з класів така класифікація не годиться.

Не вдається також класифікувати всі сплави у межах кожного з вказаних класів за однією або кількома близькими властивостями. Властивості, характерні та важливі для одних сплавів (наприклад, механічні властивості та прогартуваність для конструкційних сталей), часто є другорядними для інших (наприклад, для багатьох сталей з особливими фізичними або хімічними властивостями, деяких інструментальних сталей тощо). Тому доцільно характеризувати сплави за властивістю, притаманною тільки окремим групам металів у межах кожного класу.

З урахуванням цих міркувань основною матеріальною базою машинобудування вважаються: конструкційні сталі; інструментальні сталі та сплави; сталі та сплави з особливими хімічними та фізичними властивостями; тугоплавкі метали та їхні сплави; кольорові метали та сплави на їх основі; підшипникові сплави; матеріали високої твердості; композиційні матеріали.

2. Що таке конструкційні сталі та їхні основні властивості?

Конструкційними називають сталі, що використовуються для виготовлення деталей машин, конструкцій та споруд. Конструкційні сталі

можуть бути вуглецеві та леговані. Вміст вуглецю в них зазвичай не перевищує 0,5-0,6 %. Оскільки в процесі роботи деталі

Металеві матеріали машинобудування

машин або механізмів повинні витримувати різні навантаження (статичні, динамічні, знакозмінні), то сталь, з якої вони виготовлені, повинна забезпечувати опір динамічним і ударним діям, а також втомленості.

У зв'язку з цим конструкційні сталі повинні, окрім високих механічних властивостей, які визначають при стандартних випробуваннях (σ_b , σ_T , Ψ , δ , KCU) і характеризують властивості матеріалу, мати високу конструктивну міцність, тобто міцність, яка виявляється в умовах їхнього реального використання. Так, у деталях, що піддають знакозмінним навантаженням, метал повинен мати високий опір втомленості, а деталі вузлів тертя - опір зношуванню. У багатьох випадках вимагається високий опір корозії, повзучості та інше.

Разом з тим конструкційна сталь повинна мати високі технологічні властивості: високу прогартуваність і низьку схильність до деформацій та тріщиноутворення при гартуванні, оброблятися тиском (прокатування, кування, штампування тощо) і різанням, добре зварюватися.

Конструкційні сталі поставляють у вигляді листа або заготовок та сортової гарячекатаної, каліброваної та шліфованої продукції.

Конструкційні сталі виплавляють в основних та кислих мартенівських і відкритих електропечах, а також у конверторах з продувкою киснем зверху.

Рафінування сталі нерідко проводять рідким синтетичним шлаком (СШ) у ковші та електрошлаковим переплавом (ЕШП). У деяких випадках здійснюють вакуумно-дуговий переплав (ВДП) і виплавку у вакуумних індукційних печах (ВІ). Використання цих методів рафінування знижує забрудненість сталі неметалевими вкрапленнями (оксидами, сульфідами,

3. Які методи виплавки та рафінування застосовують для одержання конструкційних сталей?

силікатними сполуками тощо), шкідливими домішками (S, P) та газами, зменшує кількість дефектів (волосовин і пористості), але погіршує обробку різанням.

Ці методи виплавки підвищують ударну в'язкість (збільшують роботу розповсюдження тріщин), що пов'язано з підвищенням чистоти сталі. Проте поріг холодноламкості при використанні нових методів рафінування змінюється несуттєво. Міцність і пластичність після переплавів практично не змінюється, але зменшується анізотропія властивостей щодо пластичності та в'язкості. При виборі режимів термічної обробки слід враховувати, що підвищення чистоти поверхневих об'ємів зерна від домішок та неметалевих включень збільшує схильність сталі, отриманої СШ, ЕШП, ВДП і ВІ, до росту розмірів зерна аустеніту при нагріванні.

4. Що впливає на механічні властивості та конструкційну міцність сталі?

Механічні властивості металів визначають поведінку матеріалу при деформації й руйнуванні під дією зовнішніх навантажень. Залежно від умов навантаження механічні властивості

можуть визначатися при: *статичному навантаженні* (навантаження на зразок зростає повільно і плавно); *динамічному навантаженні* (навантаження зростає з більшою швидкістю, має ударний характер); *повторно-змінному або циклічному навантаженні* (навантаження в процесі випробування багаторазово змінюється за величиною або за величиною і напрямком).

Нагадаємо, що: σ_b , σ_t - поріг міцності та текучості, характеризують міцність; δ , Ψ - відносні видовження і звуження, характеризують пластичність; КСЧ, T_{50} - ударна в'язкість і поріг холодноламкості, характеризують надійність конструкційного матеріалу. Стійкість проти спрацювання, корозійна стійкість, втомна міцність, жароміцність та деякі інші показники характеризують довговічність сталі.

Механічні властивості сталі залежать від її структури і складу. Поєднання термічної обробки і легування значно підвищує механічні характеристики сталі. На механічні характеристики сталі впливають також зміна вмісту вуглецю, диспергування структурних складових та зерна, наклепування. Підвищення міцності сталі, як правило, призводить до зменшення її в'язкості та пластичності.

У реальних умовах експлуатації під дією нормальних навантажень деталі машин можуть руйнуватися, а під дією дотичних напруг - пластично деформуватися і руйнуватися. Отже, щоб підвищити конструктивну міцність деталі, необхідно підвищити опір сталі відриву і в'язкому руйнуванню.

Встановлено, що збільшення вмісту вуглецю у α -твердому розчині зменшує опір відриву. Це пояснюється тим, що атоми, які проникли в ґратку α -заліза, створюють нормальні напруги розтягування II роду, що сприяють крихкому руйнуванню.

Легуючі елементи сталі не впливають на опір відриву, якщо розміри зерен не змінюються. Тому підвищення опору відриву при легуванні сталі відбувається тоді, коли легуючі елементи здрібнюють її структуру. Таким чином, для підвищення опору відриву треба досягти дрібнозернистої будови сталі з мінімальним вмістом вуглецю у фериті.

Легуючі елементи істотно підвищують пластичність, що пов'язано з більш однорідним розподілом вуглецю у твердому розчині. Між в'язким руйнуванням і пластичністю металу існує прямий зв'язок. Пластичність сталі збільшується лише при незначному вмісті в ній легуючих елементів (1-2 %). З подальшим їх збільшенням пластичність знижується. Тільки вміст нікелю понад 5 % підвищує пластичність легованої сталі.

Природу міцності загартованої й відпущеної сталі можна пояснити за допомогою теорії дислокацій. Оскільки границі блоків є місцями концентрації дислокацій, то подальше подрібнення блоків лише збільшує протяжність границь, а отже, і щільність дислокацій. На шляху руху площин ковзання кількість границь збільшується, підвищується опір пластичній деформації та міцність сталі.

Якщо легуючі елементи сприяють однорідності розподілу вуглецю в мартенситі та зменшують напруги, то після гартування і низькотемпературного відпуску сталі пластичність її збільшується. Якщо в сталь додавати більшу кількість легуючих елементів, атоми яких відрізняються за розмірами і будовою від атомів заліза, то кристалічна ґратка спотворюється, підвищуються напруги II роду і пластичність зменшується.

Зміцнення легованої сталі при високотемпературному відпуску зумовлюється подрібненням блочної структури фериту і зменшенням розмірів карбідних часточок на їхніх границях, з присутністю яких у фериті утворюється підвищена щільність дислокацій. Вміст карбідів сприяє зменшенню пластичної деформації, тобто підвищує міцність сталі.

5. Як поділяються сталі залежно від умов і ступеня розкислення?

Залежно від умов і ступеня розкислення розрізняють киплячу, спокійну і напівспокійну сталі.

При виплавленні сталі у різних агрегатах (мартенівських печах, конверторах та електропечах) рідка сталь насичується різноманітними газами. При кристалізації сталі у виливниці зі зниженням температури знижується й розчинність газів. Це призводить до їх виділення з рідкої сталі у вигляді бульбашок, які створюють ефект кипіння рідини. Така сталь має назву *киплячої*. До складу газів, що виділяються, входять водень, окис та двоокис вуглецю, азот і метан. Водень виходить як продукт розпаду води при контакті з

Металеві матеріали машинобудування

рідким металом. Азот поглинається з атмосфери. Щодо окису вуглецю й метану, то вони утворюються в результаті взаємодії закису заліза FeO та водню з вуглецем, розчиненим у сталі.

При зростанні стовпчастих кристалів виділення газових бульбашок утруднюється, вони залишаються в затверділому зливку у вигляді підкоркових пухирів витягнутої форми у напрямі росту стовпчастих кристалів. Окрім підкоркових, утворюються й внутрішні пухирі округлої форми (рис. 5.1,а).

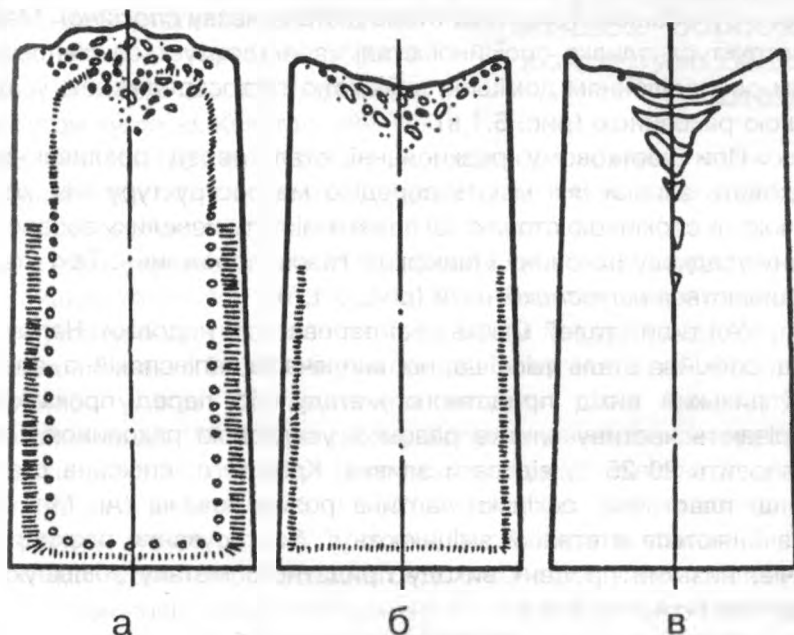


Рис. 5.1. Повздовжні перерізи зливків киплячої (а), напівспокійної (б) і спокійної (в) сталі

Киплячі сталі містять невелику кількість вуглецю (0,2-0,3 %) і застосовуються здебільшого для виготовлення деталей за методами холодної деформації. Через нерівномірність розподілення домішок якості киплячої сталі невисока.

Для підвищення якості зливка сталі її перед розливанням розкислюють, тобто в рідку сталь вводять кремній та алюміній (окрім марганцю, яким розкислюється й кипляча сталь). Кремній та алюміній мають більше споріднення з киснем ніж вуглець та залізо, тому, з'єднуючись з ним, відновлюють залізо з закису заліза з утворенням окислів кремнію та алюмінію, які піднімаються на поверхню.

Кристалізація зливка сталі відбувається без виділення газових бульбашок. Тому така сталь дістала назву *спокійної*. Макроструктура зливка спокійної сталі характеризується рівномірним розподіленням домішок, щільністю та зосередженою усадковою раковиною (рис. 5.1,в).

При частковому розкисленні сталі перед розливанням виходять зливки, які мають середню макроструктуру між киплячою та спокійною сталлю. Ці зливки містять невелику зосереджену усадкову раковину і підіркові газові порожнини. Такі сталі називаються *напівспокійними* (рис. 5.1,б).

Усі типи сталей мають свої переваги та недоліки. Наприклад, спокійна сталь якісніша, ніж кипляча та напівспокійна, але у неї низький вихід придатного металу, бо перед прокаткою обрізають частину зливка разом з усадковою раковиною, що становить 20-25 % від ваги зливка. Крім того, спокійна сталь менш пластична, оскільки частина розкислювачів (Al, Mn, Si) розчиняються в сталі й зміцнюють її. Застосування розкислювачів, низький процент виходу придатного металу збільшують вартість спокійної сталі.

Злинок киплячої сталі практично не обрізають перед прокаткою і вихід придатного металу становить 95 %. При прокатці зливка киплячої сталі підіркові пухирі заварюються завдяки високій температурі й тиску. Застосовується так зване ковальське (горнове) зварювання. Кипляча сталь дешевша за спокійну через високий вихід придатної сталі й менші витрати на розкислювачі, але має низьку якість. Тому спокійні сталі застосовують для виготовлення відповідальних деталей (тобто виробів з підвище-

ними вимогами щодо їх механічних властивостей) - шестерень, валів тощо. Кипляча сталь, маючи вищу пластичність, застосовується для сортаменту більш масового - листової сталі. Напівспокійна сталь займає проміжне становище і за вартістю, і за якістю між киплячою та спокійною сталями. Кипляча, спокійна та напівспокійна сталі маркуються відповідно кп, сп та нс.

Термічна обробка конструкційних сталей забезпечує вищі механічні властивості деталей машин. Режими термічної обробки сталей визначаються переважно вмістом вуглецю. Конструкційні ле-

говані сталі піддають гартуванню і відпуску, причому низьковуглецеві сталі після цементації відпускають при низьких температурах, а середньовуглецеві зазвичай - при високих (поліпшення).

При гартуванні деталі нагрівають до температури, яка перевищує точку A_{c3} на $30-50^{\circ}\text{C}$. Для низьковуглецевих сталей температура гартування становить 900°C , а для середньовуглецевих - близько 850°C . Низьколеговані й вуглецеві сталі охолоджуються у воді. Маловуглецеві леговані сталі при відпуску нагрівають до 150°C . При такому відпуску утворюється структура відпущеного мартенситу. Середньовуглецеві леговані сталі при відпуску нагрівають до $550-650^{\circ}\text{C}$. Внаслідок цього утворюється сорбітна структура. На практиці застосовують також й інші режими термічної обробки легованих конструкційних сталей.

При повільному охолодженні після відпуску в сталі виникає відпускна крихкість. Розрізняють два її роди. При 300°C у всіх сталей з'являється відпускна крихкість I роду. Виникнення її пояснюється нерівномірністю розпаду перенасиченого твердого розчину вуглецю у α -залізі. При збільшенні тривалості відпуску або при підвищенні температури відбувається повний розпад α -розчину і в'язкість сталі відновлюється.

6. Які особливості термічної обробки конструкційних сталей?

При повільному охолодженні після відпуску в сталях, легуваних карбідоутворюючими елементами (Mn, Cr), за температур 550-600°C виникає відпускна крихкість II виду. Сталі, схильні до відпускної крихкості після відпуску, необхідно швидко охолоджувати в маслі або у воді. У процесі роботи такі сталі варто не нагрівати до 500-600°C, оскільки за такої температури вони стають крихкими.

7. За якими ознаками класифікують вуглецеві конструкційні сталі?

Залежно від способу виготовлення виробу та висунутих до нього вимог вуглецеві конструкційні сталі поділяються на сталі звичайної якості та якісні. У сталях звичайної якості кількість шкідливих домішок збільшена (сірки - до 0,06 %, фосфору - до 0,08 %). В якісних сталях вміст сірки не

повинен перевищувати 0,04 %; фосфору - 0,035-0,040 %.

Сталі вуглецеві звичайної якості бувають гарячекатаними (прокат сортовий, фасонний, товстолистовий, тонколистовий, широкополосний) і холоднокатаними (тонколистова сталь). З підвищенням номеру марки сталі зростає поріг міцності (σ_B) і текучості ($\sigma_{0,2}$) та знижується пластичність (δ , Ψ). Найпоширеніша сталь Ст3сп має $\sigma_B = 380-490$ МПа, $\sigma_{0,2} = 210-250$ МПа, $\delta = 25-22$ %, а Ст5сп - $\sigma_B = 500-640$ МПа, $\sigma_{0,2} = 240-280$ МПа, $\delta = 20-17$ %. Чим більша товщина прокату, тим нижчі значення σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , Ψ . До сталей звичайної якості входять сталі марок Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6. Букви Ст означають сталь, а цифри від 0 до 6 - умовний номер марки сталі залежно від хімічного складу і механічних властивостей.

Для позначення ступеня розкислення сталі після номера ставлять індекси: кп - кипляча; сп - спокійна; нс - напівспокійна, наприклад: Ст3кп, Ст3нс, В Ст3сп тощо.

Із сталей звичайної якості виготовляють гарячекатаний прокат: балки, швелери, кутики, прутки, а також листи, труби,

Металеві матеріали машинобудування

поковки. Сталі в стані поставки широко використовують у будівництві для зварних, клепаних і болтових конструкцій, рідше - для виготовлення малонавантажених деталей машин (вали, вісі, зубчасті колеса тощо).

Зварні конструкції виготовляють здебільшого зі спокійних і напівспокійних сталей. Для сталей, призначених для зварних конструкцій, важлива низька чутливість до термічного старіння, а для сталей, що піддаються холодній правці та вигинанню, - низька схильність до деформаційного старіння.

Сталі звичайної якості мають зазвичай спеціалізоване призначення, використовуються у мосто- і кораблебудуванні, сільськогосподарському машинобудуванні тощо, нерідко вони надходять до споживача з урахуванням особливих технічних умов.

Сталі вуглецеві якісні маркують цифрами 08, 10, 15, 20,...,85. Цифри вказують середній вміст вуглецю в сотих долях процента. Низьковуглецеві сталі 08, 08кп характеризуються низькою міцністю і високою пластичністю. Ці сталі без термічної обробки використовують для малонавантажуваних деталей (прокладки, шайби, капоти тракторів тощо), елементів зварних конструкцій, штампованих виробів тощо. Здатність сталі до штампування тим менша, чим більше в ній вуглецю. Кремній, підвищуючи границю текучості, знижує здатність сталі до штампування. Тому для холодної штамповки, особливо для витяжки, ширше використовують холоднокатані киплячі сталі 08кп (нерозкислені кремнієм).

Сталі 15, 20, 20кп, 25 використовують без термічної обробки або у нормалізованому вигляді. Вони надходять у вигляді прокату, поковок, труб, листів, стрічки та дроту і призначаються для менш відповідальних деталей. Така сталь добре зварюється і використовують для цементованих деталей, що працюють на зношування і не зазнають великих навантажень. З такої сталі виготовляють, наприклад, кулачкові валики, втулки, малонавантажені шестерні, шпинделі, вилки і валики переключення пере-

дач та багато інших деталей автотракторного, сільськогосподарського і загального машинобудування.

Середньовуглецеві сталі 30, 35, 40, 45, 50 використовують після нормалізації, поліпшення і поверхневого гартування для самих різноманітних деталей в усіх галузях машинобудування (колінчасті й розподільні вали, шатуни, шестерні, шпинделі, фрикційні диски, штоки, плунжери тощо). Ці сталі в нормалізованому стані, порівняно з низьковуглецевими, мають вищу міцність за нижчої пластичності. Сталі у відпаленому стані досить добре обробляються різанням. Прогартуваність їх невелика. Критичний діаметр при гартуванні у воді не перевищує 10- 12 мм (95 % мартенситу). Тому їх слід використовувати для виготовлення невеликих деталей або для більш крупних, які не вимагають наскрізної прогартуваності.

Сталі марок 60, 65, 70, 75, 80 і 85 характеризуються вищою міцністю, стійкістю проти спрацювання і пружними властивостями. Використовуються вони після гартування і відпуску, нормалізації і відпуску та поверхневого гартування для деталей, що працюють в умовах тертя та піддаються високим статичним і вібраційним навантаженням. З таких сталей виготовляють пружини і ресори, шпинделі, замкові шайби, прокатні валки тощо.

8. Який склад і маркування автоматних сталей?

До вуглецевих конструкційних сталей належать також автоматні сталі. Ці сталі добре обробляються різанням на верстатах-автоматах (звідси й назва «автоматні сталі») і при цьому отримується висока якість поверхні. За хімічним складом вони поділяються на шість груп: 1 - вуглецева сіркова; 2 - вуглецева, що містить свинець; 3 - вуглецева, що містить сірку та селен; 4 - хромиста, що містить сірку та селен; 5 - сіркомарганцева, що містить свинець; 6 - легована, що містить свинець.

Перша група включає шість марок сталей: А11, А12, А20, А30, А35, А40. Автоматні сталі маркуються буквою А, цифра за

буквою означає середній вміст вуглецю (в сотих долях процента). Допускається вміст сірки до 0,3 %. Якщо сталь легована свинцем, за буквою А стоїть буква С, а потім цифра, що означає вміст вуглецю та інших легуючих елементів (відповідно до стандартного маркування конструкційних сталей). До другої групи належать сталі марок АС14, АС40; до третьої та четвертої - А35Е, А45Е і А40ХЕ; до п'ятої та шостої - леговані сталі марок АС12ХН, АС14ХГН, АС19ХГН, АС20ХГНМ, АС30ХМ, АС38ХГМ і АС40ХГНМ.

Якщо легувати ці сталі сіркою, свинцем (0,15-0,35 %), селеном (0,04-0,10 %), стружка при різанні стає більш ламкою, водночас сульфіди та свинець діють як мастильний матеріал і сприяють одержанню поверхні вищої якості. Все це підвищує оброблюваність сталі.

Автоматні сталі, леговані вказаними елементами, оброблюються різанням у кілька разів легше. При цьому підвищується також довговічність інструмента (як із швидкорізальних сталей, так і твердосплавного).

Вуглецеві автоматні сталі А11, А12, А20 використовуються для виготовлення невідповідальних деталей - болтів, гайок, дрібних деталей швейних, текстильних, обчислювальних машин тощо. Ці сталі не піддають термічній обробці.

Решта сталей піддаються термічній обробці, за властивостями вони мало відрізняються від сталей такого ж складу, але не легованих сіркою, селеном і свинцем.

Останнім часом поширилося модифікування автоматних сталей кальцієм, маркування буквами АЦ - сталь автоматна кальцієва (Ц); якщо ж, крім сірки (0,035-0,060 %) у сталі наявний свинець - АСЦ. Вміст решти елементів позначається відповідно до стандарту. Автоматні сталі цього класу мають високі механічні властивості й можуть бути використані для виготовлення відповідальних деталей.

9. Як впливають легуючі елементи на властивості конструкційних сталей?

Основними легуючими елементами конструкційних сталей є хром у кількості до 1,8 % (частіше 0,8-1,1 %), нікель (0,5-4,5 %), кремній (0,5-1,2 %) і марганець (0,8-1,8 %). Вольфрам, молібден, ванадій, титан, бор, інші легуючі елементи як самостійні до-

мішки не використовують, а вводять у сталь, поєднуючи з хромом, нікелем і марганцем для поліпшення властивостей. Зазвичай у конструкційних сталях міститься: Мо - 0,15-0,45 %; W - 0,5-1,2 %; V - 0,1-0,3 %; Ti - 0,06-0,12 %; B - 0,002-0,005 %. Більшість конструкційних сталей належать до перлітного класу, а у рівноважному стані - до групи доєвтектоїдних.

Леговані сталі після термічної обробки (гартування і відпуску) характеризуються кращими механічними властивостями, які незначною мірою відрізняються від механічних властивостей вуглецевої сталі у виробках малих перерізів. У виробках великих перерізів (діаметром 15-20 мм) механічні властивості легованих сталей значно вищі, ніж вуглецевих. Особливо підвищуються поріг текучості, відносне звуження і ударна в'язкість. Це пояснюється тим, що леговані сталі мають меншу критичну швидкість гартування, а отже, кращу прогартуваність. Крім того, після термічної обробки вони мають дрібніше зерно і більш дисперсні структури. Через більшу прогартуваність і меншу критичну швидкість гартування заміна вуглецевої сталі легованою дозволяє виконувати гартування деталей в менш різких охолоджуючих середовищах (масло, повітря), що знижує деформацію виробів і небезпеку утворення тріщин. У зв'язку з цим леговані сталі використовують не лише для великих виробів, але й для виробів невеликого перерізу, що мають складну форму. Чим вища концентрація легуючих елементів у сталі, тим вища її прогартуваність.

Легуючі елементи підвищують стійкість мартенситу проти відпуску і уповільнюють коагуляцію карбідів. Тому для отримання

Металеві матеріали машинобудування

необхідної міцності та твердості леговані сталі піддають відпуску на вищій температурі ніж вуглецеві. Це дозволяє не тільки повністю зняти напруги гартування, але й краще поєднати міцність і в'язкість.

Надмірне легування може погіршити механічні властивості та технологічність сталі (обробку різанням, зварюваність тощо). Винятком є нікель і молібден.

Для цементованих виробів використовують низьковуглецеві (0,1-0,25 % C) сталі. За зміцненням серцевини цементованих сталей при термічній обробці їх поділяють на три групи:

**10. Які
основні
властивості
цементованих
сталей та
вимоги до них?**

- вуглецеві сталі з незміцненою серцевиною;
- низьколеговані сталі зі слабко зміцненою серцевиною;
- високолеговані сталі зі зміцненою серцевиною, які називають високоміцними цементованими.

Після цементації, гартування і низького відпуску цих сталей цементований шар повинен мати твердість 58-62 HRC, а серцевина - 20-40 HRC.

До цементованих сталей *першої групи*, що містять 0,1-0,3 % вуглецю, відносяться вуглецеві сталі марок 10, 15, 20. Вони використовуються для виробів невеликих розмірів, що працюють на зношування і не вимагають високої міцності серцевини. Після цементації сталі гартують і піддають низькому відпуску. Завдяки такій обробці твердість поверхневого шару досягає 60 HRC, а серцевина має твердість - 15-30 HRC.

Для виробів, які мають значні розміри і витримують більші навантаження використовують леговані сталі другої і третьої груп. Серцевина таких сталей повинна мати високу межу текучості, а цементований шар - високу твердість і зносостійкість.

До *другої групи* цементованих сталей належать сталі 15X, 20X, 15XP, 20XP, що містять 0,7-1,0 % Cr. Вони використовують-

ся для виготовлення деталей нескладної форми (втулок, пальців, валиків, деяких зубчастих коліс), що цементуються на глибину 1,0-1,5 мм. Прогартовуваність хромистих сталей невелика. Критичний діаметр для 95 % мартенситу при гартуванні у воді 12-20 мм і при гартуванні в маслі - 5-12 мм.

До *третьої групи* цементованих сталей відносяться хромо-нікелеві, хромонікельвольфрамові, хромомарганцеві, хромомарганцевонікелеві сталі, додатково леговані вольфрамом, молібденом або бором: 12ХН3А, 18Х2Н4ВА, 18ХГТ, 20ХГР, 18ХНМФЛ. Значна стійкість переохолодженого аустеніту в області перлітного і проміжного перетворень забезпечує їхню високу прогартовуваність. Критичний діаметр прогартовуваності при гартуванні у маслі становить 100 мм. Це уможливорює гартування деталей чималих розмірів з охолодженням у маслі, а в окремих випадках - на повітрі, що значно зменшує деформацію.

Цементовані сталі поділяються на три групи за структурою серцевини при охолодженні у маслі: ферито-перлітна, бейнітна або мартенситна.

11. Які основні властивості поліпшуваних сталей та вимоги до них?

Поліпшуваними конструкційними сталями називають сталі, що використовуються після гартування і високого відпуску (поліпшення). Сталі вміщують 0,3-0,5 % С і 3-5 % легуючих елементів. Легуючими елементами є Cr, Ni, Mo, Mn, Si. Іноді у ці сталі вводять близько 0,1 % елементів V, Ti, Zr, що сприяє подрібненню зерен. Середньовуглецеві сталі піддають гартуванню при 820-880°C (залежно від складу) в маслі (об'ємні деталі охолоджують у воді) і високому відпуску при 550-650°C. Вони повинні мати високий поріг текучості, малу чутливість до концентраторів напружень, а у виробках, що працюють при багаторазовоприкладних навантаженнях - високу границю витривалості і достатній запас в'язкості. Крім того, поліпшувані сталі повинні мати добру прогартовуваність і малу чутливість до відпускнуї крихкості.

Чим більше в сталі легуючих елементів, тим більша її прогартовуваність. Оскільки механічні властивості сталі різних марок після поліпшення у випадку наскрізної прогартовуваності близькі, то не механічні властивості, а прогартовуваність визначає вибір сталі для тієї чи іншої деталі.

Чим більший переріз деталі, тим більш леговану сталь слід обирати. Для зменшення розвитку відпускнуї крихкості, що особливо небезпечно для великих деталей, які неможливо швидко охолоджувати при відпуску, слід використовувати сталі, що містять молібден (0,15-0,30 %).

Поліпшувані сталі умовно поділяють на п'ять груп. Зі збільшенням номера групи зростає ступінь легування, а отже, розмір перерізу, в якому досягається наскрізна прогартовуваність.

Першу групу складають вуглецеві сталі марок 35, 40, 45, які використовуються тільки для виробів невеликих перерізів (до 10 мм), що працюють при незначних навантаженнях.

До другої групи належать сталі, леговані переважно хромом або хромом і бором (для підвищення прогартовуваності): 30Х, 38Х, 40Х, 50Х, 38ХР, 40ХР (0,8-1,1 % Cr; 0,002-0,005 % В).

Для підвищення прогартовуваності хромисті сталі піддають додатковому легуванню марганцем, кремнієм, молібденом - сталі 40ХГ, 40ХГР, 30ХГС, 30ХМ, 30ХГТ (Ті подрібнює зерно). Ці сталі відносяться до третьої групи.

До складу четвертої групи входять ті сталі, що містять 1-1,5 % нікелю: 40ХН, 40ХНР, 40ХНМА. Ці сталі мають підвищену прогартовуваність, низькі температури холодноламкості та підвищену конструктивну міцність. Їх рекомендують для деталей перерізом 40-70 мм.

Сталі п'ятої групи мають 2-3 % нікелю і додатково леговані молібденом, вольфрамом для зменшення зворотної відпускнуї крихкості при високому відпуску: 34ХНЗМ, 38ХНЗМФА, 30ХН2ВФА. Сталі мають високу прогартовуваність і рекомендуються для деталей перерізом понад 70 мм.

12. Які основні властивості пружинно-ресорних сталей та вимоги до них?

Високовуглецеві сталі навантажують ще інструментальними, тобто кільки з них виготовляють інструменти. Проте у певних випадках високовуглецеві сталі використовуються як конструкційні для виготовлення деталей машин: пружин, ресор, шарикопідшипників тощо. Такі сталі відповідно називають пружинно-ресорними та шарикопідшипниковими.

Пружинно-ресорні сталі загального призначення характеризуються високим опором малим пластичним деформаціям і високою границею витривалості, мають достатню пластичність, опір крихкому руйнуванню, підвищену релаксаційну стійкість.

Щоб отримати перелічені властивості, у сталях повинно бути 0,5-0,8 % С, їх піддають гартуванню і відпуску при температурі 400-500°C. Під час термічної обробки пружини й ресори, залежно від марки сталі, нагрівають до 800-850°C, а потім охолоджують у воді або в маслі. При цьому сталь набуває структури трооститу з твердістю 35-45 HRC.

Для пружин малого перерізу, що працюють при невисоких навантаженнях і гартуються в маслі, використовують вуглецеві сталі 65, 70, 75, 85, а також сталі з підвищеним вмістом марганцю - 60Г, 65Г і 70Г. Для деталей діаметром 5-8 мм і більшою гартування вуглецевих сталей проводять у воді.

Найчастіше для виготовлення пружин і ресор використовують леговані сталі, що містять (в %) Si - 1,5-2,8; Mn - 0,6-1,2; Cr - 0,2-1,2; V - 0,1-0,25; W - 0,8-1,2 і Ni - 1,4-1,7. Ці елементи забезпечують необхідну прогартовуваність і загартовуваність, подрібнюють зерно й підвищують релаксаційну стійкість сталі.

У промисловості найчастіше використовують кремніст сталі 55С2, 60С2А, 70С3А. Через те, що кремній підвищує загартовуваність, уповільнює розпад мартенситу при відпуску і значно зміцнює ферит, кремністі сталі мають високі межі текучості і пружності, що значно поліпшує їхні властивості. З цих сталей

Металеві матеріали машинобудування

виготовляють пружини, ресори, торсіони тощо. Проте кремністі сталі схильні до знеуглецювання, утворення поверхневих дефектів при гарячій обробці й графітоутворення, що суттєво знижує поріг витривалості. Додаткове легування кремністих сталей вольфрамом, марганцем, вольфрамом та нікелем збільшує їхню прогартуваність і зменшує схильність до знеуглецювання, графітизації і росту зерна при нагріванні.

Для пружин і ресор, які мають чималі розміри й призначені для витримування значних навантажень використовують сталі 60С2ХФА та 65С2ВА, що мають високі прогартуваність, міцність та релаксаційну стійкість. Коли пружні елементи працюють в умовах сильних динамічних навантажень, використовують сталі з нікелем 60С2Н2А.

Автомобільні ресори виготовляють зі сталі 50ХГА, яка за технологічними властивостями переважає кремністі сталі. Для виготовлення пружин рекомендується сталь 50ХФА, оскільки сталі з вмістом кремнію не схильні до перегріву і знеуглецювання. Проте така сталь має малу прогартуваність і може застосовуватися лише для пружин з перерізом дроту менше 5-6 мм. Щоб збільшити прогартуваність, сталь легують марганцем (50ХГФА), проте він знижує ударну в'язкість.

Нерідко пружини виготовляють з патентованого холодно-кваліфікованого дроту, виготовленого з високовуглецевих сталей 65, 60Г, 70, У8, У9, У10. Високі механічні властивості дроту досягаються патентуванням і наступним протягуванням зі ступенем деформації не менше 70 %. Дріт шліфують, потім навивають його у пружини і відпускають при 250-350°C, щоб зняти внутрішні напруження й підвищити поріг пружності.

Довговічність пружин і ресор може бути підвищена гідродабразивною і дробоструминною обробками (поверхневим наклепом), що створює у поверхневих шарах залишкові напруження стиску і знижує робочі напруження розтягу в зовнішніх волокнах. Після дробоструминної обробки поріг витривалості підвищується у 1,5-2 рази.

13. Які вимоги ставляться до шарикопідшипникових сталей та їхні основні властивості?

У машинобудуванні до багатьох деталей ставляться вимоги високої стійкості проти спрацювання. Зазвичай це деталі, що піддаються тертю. Виділяють в окремі групи сталі, з яких виготовляють підшипники кочення і підшипники ковзання.

Деталі підшипників (кульки, ролики і кільця) витримують значні локальні навантаження. Тому сталь для шарикопідшипників повинна бути дуже твердою й міцною, чинити опір контактній втомі.

Як шарикопідшипникові використовують високовуглецеві хромисті сталі, що містять близько 1 % вуглецю і від 0,6 до 1,5 % Cr : ШХ6 (~0,6 % Cr), ШХ9 (~0,9 % Cr), ШХ15 (~1,5 % Cr), а для чималих перерізів - хромомарганцевокремністу сталь, що прогартовується на значну глибину ШХ15СГ (~1,5 % Cr, 1,0 % Mn, 0,5 % Si).

До сталей цього класу ставляться високі вимоги щодо вмісту неметалевих включень, оскільки, потрапляючи в поверхневий робочий шар, вони стають концентраторами напружень, викликаючи завчасне втомне руйнування. Неприпустимою є також карбідна неоднорідність. Сталі після відпалу повинні мати однорідну структуру дрібнозернистого перліту з дрібними включеннями вторинних карбідів. Твердість у цьому стані 187-207 НВ, що забезпечує досить добру оброблюваність різанням. Кільця, кульки і ролики після гартування в маслі при 830-860°C (для сталі ШХ15) і 810-850°C (для ШХ15СГ) і низького відпуску при 150-200°C повинні мати твердість не нижче 62 НРС. У структурі остаточно обробленої сталі міститься близько 15 % залишкового аустеніту. При підвищених вимогах до підшипників (прецезійні - особливо точні підшипники) рекомендується після відпуску охолодження до -10-20°C для забезпечення перетворення залишкового аустеніту при негативних температурах.

Крупногабаритні кільця і ролики виготовляють з цементованою хромопідкритою сталлю 20Х2Н4А. Після цементації при температурі 940-970°C на глибину 5-10 мм вказані деталі підшипників піддають високому відпуску для усунення залишкового напруження. Гартування деталей, нагрітих до 800°C, здійснюють в олії при температурі 40-60°C, а потім - низькотемпературний відпуск при 160°C.

Для підшипників, що працюють в агресивних середовищах, використовують корозійностійку сталь 95Х18 (0,9-1,0 % С і 17-18 % Cr). Підшипники, що працюють при температурі до 400-500°C, виготовляють зі швидкорізальних сталей Р9, Р18, Р6М5.

Інструментальними сталями називають вуглецеві і легировані сталі, що містять понад 0,6-0,7 % С. Такі сталі характеризуються високою твердістю (60-65 HRC), міцністю та стійкістю проти спрацювання і використовуються для виготовлення різного інструменту. Як правило, це заєвтектоїдні або ледебуритні сталі, структура яких після гартування і низького відпуску - мартенсит і надлишкові карбіди.

Для кращої орієнтації при виборі сталей для інструментів інструментальні сталі класифікують за двома ознаками: за властивостями і за призначенням.

За основну властивість при цій класифікації прийнято *теплостійкість* (або червоностійкість), тобто стійкість проти відпуску при нагріві інструменту в процесі роботи. На рис. 5.2 наведено схему класифікації інструментальних сталей за властивостями, запропоновану Ю. О. Геллером. На цій самій схемі вказані деякі марки сталей, що належать до тієї чи іншої групи.

14. Які сталі називають інструментальними, їх класифікація та маркування?

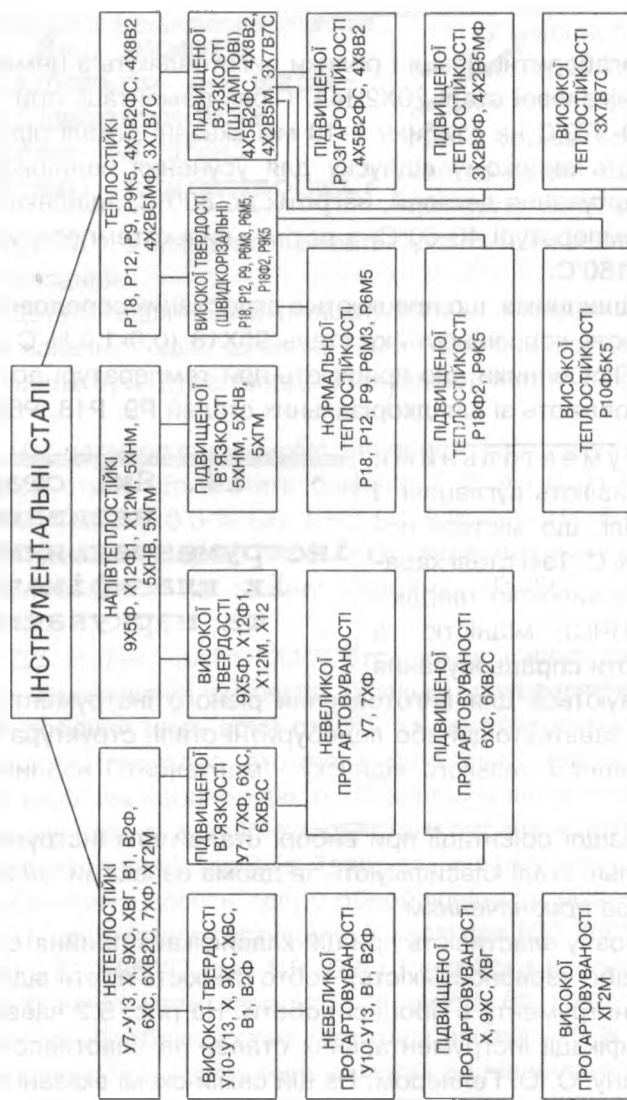


Рис. 5.2. Схема класифікації інструментальних сталей

Усі інструментальні сталі можна поділити на *нетеплостійкі*, *напівтеплостійкі* та *теплостійкі*.

До *нетеплостійких* відносять сталі, в яких процес незворотного знеміцнення починається при температурах нагріву 150-300°C (вуглецеві і леговані сталі, що містять до 3-4 % легуючих елементів). У *напівтеплостійких* сталей ця температура сягає 350-500°C (містять 0,6-0,7 % С і 4-18 % Cr), у *теплостійких* температура нагріву перевищує 600°C. Це високолеговані сталі, що містять Cr, W, V, Mo, Co ледебуритного класу, які отримали назву швидкорізальних.

Іншою важливою характеристикою інструментальних сталей є *прогартовуваність*. Високолеговані теплостійкі і напівтеплостійкі сталі мають високу прогартовуваність. Інструментальні сталі, що не відзначаються теплостійкістю, поділяють на сталі невеликої прогартовуваності (вуглецеві) і підвищеної прогартовуваності (леговані).

За *призначенням* розрізняють такі групи інструментальних сталей: сталі для ріжучого інструменту; штампові сталі для холодного деформування; штампові сталі для гарячого деформування і прес-форм для лиття під тиском; сталі для вимірювального інструменту і деталей високої точності.

Окрему групу інструментальних матеріалів становлять так звані *тверді сплави*, що використовуються для інструменту, який працює на особливо високих швидкостях різання.

Вуглецеві інструментальні сталі маркують буквою У; наступна за нею цифра (У7, У8, У10) означає середній вміст вуглецю в десятих долях процента. Буква А (У10А) в кінці марки вказує, що сталь високоякісна.

Леговані інструментальні сталі Х, 9Х, 9ХС, 5ХВГ маркують цифрою, що вказує на середній вміст вуглецю в десятих долях процента, якщо його вміст менше 1 %. Якщо вміст вуглецю ~1 %, то цифра частіше відсутня. Буквами позначають легуючі елементи, а цифри за ними вказують вміст (у цілих процентах) відповідного легуючого елемента.

15. Які основні вимоги до властивостей інструментальних сталей?

Червоностійкість. Тонке лезо різального інструменту працює при значних питомих тисках. Механічна енергія під час різання перетворюється на теплову, що зумовлює значне нагрівання інструменту. За таких умов роботи інструмент стає тупим і зношується. Щоб підвищити стійкість різальної кромки проти стирання, сталі надають такої властивості, як червоностійкість (теплостійкість) - збереження твердості при тривалому нагріванні.

Твердість. Оскільки твердість характеризує опір матеріалу пластичним деформаціям, то від твердості передусім залежить постійність форми і розмірів інструменту при роботі. Підвищення твердості супроводжується збільшенням чистоти поверхні оброблюваного металу та зменшенням спрацювання інструмента і налипання на нього металу.

Міцність. Характеристикою міцності інструментальних сталей є поріг міцності на згин. Це зумовлено тим, що згин - м'якший спосіб навантаження, ніж розтяг, і для крихких матеріалів дає змогу точніше виявити вплив структурного стану на властивості сталі. Крім того, більшість інструментів працюють в умовах

Сталеві матеріали машинобудування

напруженого стану, близького до згину. Міцність сталі зростає з підвищенням твердості до 52-54 HRC. На міцність значно впливають внутрішні напруження, величина зерна, розподіл карбідів.

В'язкість. Характеристикою опору інструментальних сталей крихкому руйнуванню є питома робота руйнування при ударному згині ненадрізаних зразків. Порівняно зі значенням порогу згину ударна в'язкість чутливіша до величини зерна, зміни складу сталі, карбідної неоднорідності. Значне підвищення в'язкості досягається зменшенням вуглецю в сталі й відпуском при підвищених температурах, коли твердість має значення 40-52 HRC.

Оброблюваність різанням. Кращою оброблюваністю різанням характеризуються сталі зі структурою зернистого перліту. Легуючі елементи, що зміцнюють ферит (особливо кремній), збільшена кількість і твердість карбідної фази погіршують оброблюваність різанням.

Здатність до шліфування. Чистота поверхні під час шліфування погіршується за присутності в структурі крупних і неоднорідно розподілених карбідів. Шліфовочні тріщини з'являються в сталі, структура якої вміщує понад 10-12 % залишкового аустеніту. Зміна властивостей (зниження твердості) поверхневого шару після шліфування спостерігається при інтенсивних режимах шліфування (відбувається відпуск) у сталях з малою теплостійкістю. Ця небезпека зростає, якщо сталь має низьку теплопровідність (леговані сталі).

Загартовуваність. Загартовуваністю називають здатність сталі внаслідок гартування набувати мартенситної структури й високої твердості. Для інструментальних сталей загартовуваність визначається здатністю сталі набувати високу твердість під час гартування у м'яких охолоджувальних середовищах (масло, гарячі середовища, повітря). Можливість досягти високої твердості використанням м'яких охолоджувачів має важливе значення, бо зменшує гартувальні напруження і запобігає утворенню тріщин.

Здатність до деформації характеризує зміну форми інструменту при термічній обробці внаслідок пластичної деформації. Деформацію викликають напруження, які неоднорідно розподілені в різних частинах інструменту. Найменшою деформацією при гартуванні характеризуються високолеговані сталі ледебуритного класу.

Зменшенню деформації при термічній обробці інструменту сприяють: уповільнення охолодження при гартуванні, ізотермічне або сходинкове гартування, використання сталі підвищеної легованості та ненаскрізна прогартовуваність.

Стійкість проти утворення тріщин. Тріщини, як правило, утворюються при гартуванні в інтервалі температур мартенситного перетворення. Ймовірність утворення тріщин тим більша, чим складніша форма інструменту і менша чистота поверхні (надрізи, риски тощо). Сталі з вихідною структурою зернистого перліту менш схильні до утворення тріщин. Небезпека утворення тріщин зростає з підвищенням температури гартування, зі збільшенням швидкості охолодження в області температур мартенситного перетворення.

Стійкість проти знеуглецювання. Крім температури та нагрівального середовища збільшують схильність до знеуглецювання такі складові сталі: кремній при вмісті 0,8-1,0 %, молібден і кобальт при вмісті понад 3-3,5 %.

Чутливість до перегріву (ріст зерна). Чутливіші до перегріву доевтектоїдні, евтектоїдні вуглецеві сталі та сталі, до складу яких входить марганець.

16. Які сталі використовують для виготовлення різального інструменту та які особливості їхньої термічної обробки?

Залежно від інтенсивності режимів різання різальні інструменти виготовляють з нетеплостійких (вуглецевих, малолегованих) чи теплостійких високо-

легованих (швидкорізальних) сталей.

Нетеплостійкі вуглецеві сталі зі зниженою прогартовуваністю. Ці сталі можна використовувати для виготовлення рі-

ального інструменту для обробки матеріалів з низькою твердістю і з малою швидкістю, бо їхня висока твердість знижується при нагріванні понад 200°C.

Вуглецеві інструментальні сталі марок У8 (У8А), У10 (У10А), У11 (У11А), У12 (У12А), У13 (У13 А) внаслідок малої стійкості переохолодженого аустеніту мають невелику прогартовуваність. Повна прогартовуваність при охолодженні у воді досягається лише в інструментах, діаметр яких не перевищує 10-12 мм.

З вуглецевих інструментальних сталей зі зниженою прогартовуваністю виготовляють різні інструменти. Наприклад, сталь У7 застосовують для виготовлення зубил, ковальських штампів, ковальського інструменту, клейм. Ці інструменти у процесі роботи зазнають ударів, поштовхів - отже, сталь для них повинна мати підвищену в'язкість і знижену твердість (50-52 HRC).

Зі сталі У8 виготовляють інструменти, які зазнають ударів: матриці, пуансони, ножиці та ножі по металу, пневматичні й столлярні інструменти.

Для виготовлення металорізального інструменту, який не зазнає сильних ударів (свердла, мітчики, розвертки, різці, фрези, буровий і медичний інструмент, ножі для різання паперу і шкіри тощо) рекомендуються сталі У9 і У10. Сталі У12 і У13 використовують для виготовлення різців, напилків, зубил для насікання напилків, граверного інструменту, волоочильних дощок тощо.

Властивості вуглецевих інструментальних сталей, режими їхньої термічної обробки залежать, передусім, від вмісту в сталі вуглецю (рис. 5.3).

Вуглецеві сталі у вихідному (відпаленому) стані мають структуру зернистого перліту і низьку твердість (170-180 НВ). Температура гартування вуглецевих інструментальних сталей У8 - У12 повинна бути 780-810°C, тобто перевищувати A_{c1} , на 50-70°C, але нижче A_{cm} . Такий температурний режим необхідний для того, щоб при гартуванні сталь одержувала мартенситну структуру, зберігала дрібне зерно і нерозчинені частинки вторинного цементиту. Гартування проводять у воді, через воду на

масло або у водних розчинах солей. Для зняття напружень і поліпшення механічних властивостей інструмент піддають відпуску при 150-170°C для збереження високої твердості (62-63 HRC).

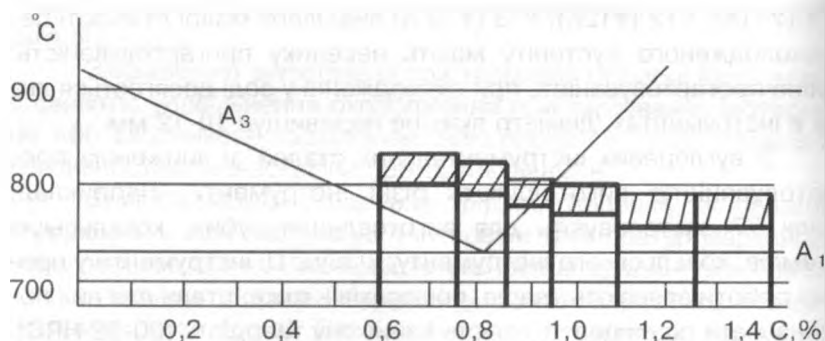


Рис. 5.3. Температура гартування вуглецевих інструментальних сталей

Доевтектоїдну сталь У7 гартують з нагрівом вище точки A_{c3} на 30-50°C і піддають відпуску при температурі 275-325°C (48-58 HRC). Для окремих видів інструменту відпуск проводять при 400-500°C (44-48 HRC).

Нетеплостійкі малолеговані сталі з підвищеною прогартуваністю. Леговані інструментальні сталі, подібно до вуглецевих, не є теплостійкими й придатні тільки для різання відносно м'яких матеріалів з невеликою швидкістю. Їх використовують для інструменту, який не піддається в роботі нагріву понад 200-250°C.

Проте леговані сталі, порівняно з вуглецевими, відзначаються більшою стійкістю переохолодженого аустеніту. Отже, їх піддають гартуванню в маслі й прогартовують на значну глибину. При цьому інструмент, виготовлений з такої сталі, не деформується і не жолобиться навіть при складній конфігурації виробів. Критичний діаметр при гартуванні в маслі - 40-80 мм.

Леговані інструментальні сталі діляться на три групи. Сталі 1-ої групи, Х, 9ХС, ХГСВФ, містять від 1 до 1,5 % хрому, який підвищує прогартуваність. Уведення кремнію підвищує стійкість

проти відпускання та працездатність інструменту. Проте сталь ХС схильна до знеуглецювання при нагріві, у відпаленому стані має підвищену твердість (217-247 НВ), що погіршує її обробку різанням і тиском.

Сталі 2-ої групи ХГ, ХВГ мало деформуються при термічні обробці. Завдяки присутності в їхньому складі марганцю при гартуванні в них збільшується кількість залишкового аустеніту, що зменшує деформування інструментів. Сталь ХВГ характеризується високою твердістю (62-65 HRC), задовільною в'язкістю і значною прогартуваністю (до 75-80 мм).

Сталі 3-ої групи В1, ХВ5 леговані вольфрамом. Через те, що вольфрам сильно подрібнює надлишкову карбідну фазу, сталі цієї групи мають високу твердість. Сталь ХВ5 називається ще алмазною. Її твердість у загартованому і низьковідпущеному стані дорівнює 67-69 HRC.

Теплостійкі (швидкорізальні) сталі Р18, Р12, Р9, Р6М5, Р6М3, Р18Ф2, Р18Ф2К5 відрізняються від вуглецевих і малолегованих інструментальних сталей тим, що їхня твердість зберігається до температури 500-600°C. Швидкорізальні сталі мають порівняно незначний вміст вуглецю (0,7-0,95 %) і досить високий вміст легуючих елементів (до 25 %). Основними легуючими елементами є вольфрам (6-18 %), хром (близько 4 %), ванадій (1-5 %). Для підвищення теплостійкості в сталь додатково вводять кобальт (5-10 %).

На рис. 5.4 зображено залежність твердості різних інструментальних сталей і твердих сплавів від температури, з якої видно, що вуглецева інструментальна і швидкорізальна сталі за температур до 200°C мають однакову твердість. При нагріванні до 400°C твердість вуглецевої сталі знижується до 20 HRC. Швидкорізальна сталь зберігає необхідну твердість до 45 HRC при нагріванні до 600°C.

Ця особливість пояснюється тим, що при нагріванні вуглецевої загартованої сталі на мартенсит відбувається коагуляція карбідів, внаслідок чого твердість швидко знижується.

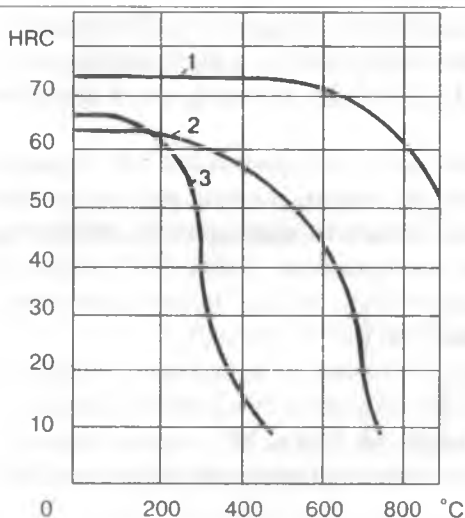


Рис. 5.4. Зміна твердості інструментальних матеріалів залежно від температури: 1 - твердий сплав, 2 - швидкорізальна сталь, 3 - вуглецева сталь

При введенні в сталь таких легуючих елементів, як W, Mo, Cr, V, утворюються спеціальні карбіди, що виділяються з мартенситу при нагріванні сталі вище 200°C. Коагуляція цих карбідів відбувається за вищих температур, ніж коагуляція карбіду заліза.

Таким чином, для підвищення червоностійкості сталі, в неї слід вводити таку кількість карбідоутворюючих елементів, яка забезпечить зв'язування майже всього вуглецю у спеціальні карбіди.

Термічна обробка швидкорізальних сталей (рис. 5.5) значно відрізняється від термообробки вуглецевих сталей. Щоб знизити твердість, покращити обробку різанням й підготувати структуру сталі до гартування, швидкорізальну сталь після кування піддають відпалу при температурі 860-880°C.

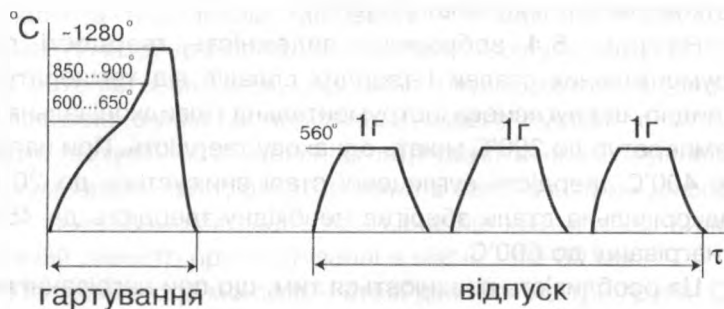


Рис. 5.5. Схема режиму термічної обробки інструменту з швидкорізальної сталі

Для сталі Р6М5 відпал проводять при 830-850°C. Після відпалу мікроструктура сталі становить рівномірно розподілені в сорбітоподібному перліті евтектичні й вторинні карбіди (рис. 5.6, а).

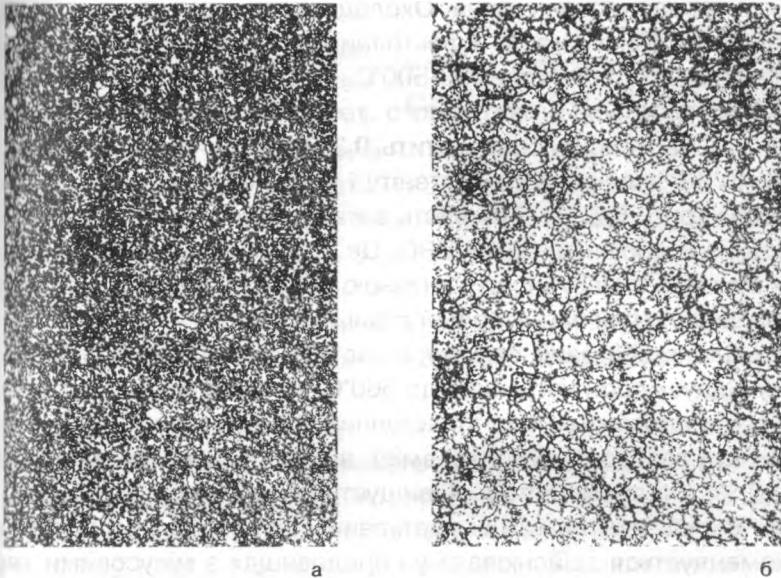


Рис. 5.6. Мікроструктура швидкорізальних сталей, х400: а - деформована і відпалена сталь, б - загартована сталь

Для надання сталі теплостійкості інструмент піддають гартуванню і багаторазовому відпуску. Температуру гартування сталі Р18 встановлюють 1270-1290°C, сталі Р12 - 1240-1260°C і Р6М5 - 1210-1230°C. Високі температури гартування необхідні для повнішого розчинення вторинних карбідів й отримання при нагріванні аустеніту, високолегованого хромом, вольфрамом, молібденом та ванадієм. Це забезпечує отримання після гартування мартенситу з високою стійкістю проти відпуску, тобто теплостійкістю. Через малу теплопровідність цих сталей при нагріванні до температури гартування використовують підігрів інструменту при 800-900°C у розплавлених солях. Інструмент

складної форми діаметром понад 30 мм, крім того, попередньо повільно підігрівають до 350-450°C. Після цього інструмент швидко нагрівають до температури гартування.

Для переведення карбідів у розчин інструмент витримують при температурі гартування. Охолоджувати інструмент при гартуванні потрібно у маслі. Ефективним є також охолодження в розплавлених солях при 400-500°C. Після гартування структура сталі складається з легованого тонкодисперсного (безструктурного) мартенситу, що містить 0,3-0,4 % С, значної кількості (~30-40 %) залишкового аустеніту і нерозчинених надлишкових карбідів (рис. 5.6, б). Твердість загартованої сталі не є максимальною й дорівнює 60-63 HRC. Це пояснюється низьким вмістом вуглецю в мартенситі і значною кількістю залишкового аустеніту в структурі загартованої сталі.

Для стабілізації структури інструмент піддають триразовому відпуску при нагріванні до 560°C, витримують за такої температури протягом 1 год з наступним охолодженням на повітрі. Після триразового відпуску вміст аустеніту зменшується з 30 до ~3 %, а твердість сталі підвищується приблизно до 65 HRC.

В окремих випадках гартування швидкорізальних сталей рекомендується здійснювати у середовищах з мінусовими температурами.

Щоб підвищити стійкість інструменту проти спрацьовування, у деяких випадках застосовують низькотемпературне ціанування при 550-560°C. Тривалість процесу - 10-30 хв. Твердість шару 1000-1100 HV, товщина його - 0,03-0,05 мм. Для підвищення протикорозійної і поліпшення різальної якостей виробу при температурі відпуску обробляють паром. При цьому на поверхні сталі утворюється тонкий шар оксиду заліза (2-3 мкм), що запобігає налипанню стружки на інструмент і підвищує його протикорозійну стійкість.

Сталі, з яких виготовляють штампи для холодного штампування, повинні мати високу твердість, стійкість проти спрацювання, міцність, опір пластичним деформаціям і, у випадку значних ударних навантажень, також підвищену в'язкість. У процесі деформування

з великою швидкістю штампи нагріваються до 200-350°C. Тому сталі такого класу повинні бути і теплостійкими. Для штампів значних розмірів необхідно забезпечити високу прогартуваність і невеликі об'ємні зміни при гартуванні.

При виготовленні штампів у багатьох випадках використовуються сталі, що застосовуються для виготовлення ріжучих інструментів.

Вуглецеві сталі У10А, У11А і У12А рекомендуються для виготовлення відносно невеликого перерізу (до 20 мм) пуансонів і штампів (витяжні, обрізні й вирубні), що працюють з динамічними навантаженнями. Після гартування і відпуску на твердість 57-59 HRC інструменти з таких сталей мають високу зносоустійкість і ударну в'язкість.

У випадку більш крупних перерізів інструменту, що працює в умовах динамічного навантаження, використовуються сталі підвищеної прогартуваності (Х, ХГС, ХВГ) або сталі з пониженим вмістом вуглецю (6ХС, 7ХФ). Температура гартування штампових сталей знаходиться в межах 870-900°C, температура відпуску - 200-250°C (твердість 53-58 HRC), інколи проводиться відпуск при 430-470°C (твердість 45-50 HRC).

Серед штампових сталей виділяють групу сталей з підвищеним вмістом хрому: від 6 до 12 % (Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф1, Х12Ф4М). Ці сталі належать до ледебуритного класу, є напівтеплостійкими і містять 16-17 % карбідів $(Cr, Fe)_7C_3$. Вони призначені для виготовлення масивних штампів складної форми,

17. Яким вимогам повинні відповідати сталі для штампів холодного штампування, їхній склад та термічна обробка?

накатних роликів, валків тощо. Сталі мають високу зносостійкість і при гартуванні в маслі мало деформуються, що важливо для штампів складної форми. Сталі гартують на первинну і вторинну твердість. Гартування виконують при високих температурах (1110-1170°C), що призводить до значного легування аустеніту хромом внаслідок розчинення карбіду $(Cr, Fe)_7C_3$ і в результаті до різкого зниження мартенситної точки. Після гартування в структурі сталі міститься до 60-80 % залишкового аустеніту і твердість становить 42-54 HRC. Після багаторазового відпуску при 500-520°C аустеніт перетворюється в мартенсит і твердість зростає до 60-62 HRC. Така обробка підвищує теплостійкість, але знижує механічні властивості, тому нею користуються тільки для обробки невеликих штампів, що не зазнають високих навантажень і розігріваються при роботі до високих температур. Частіше виконують гартування на первинну твердість, яка забезпечує меншу крихкість сталі.

Для виготовлення штампів складної форми, пневматичного інструменту, вигинальних і витяжних штампів, ножів для різання металу, пуансонів, матриць та іншого інструменту, що зазнає у роботі ударних навантажень, використовують доєвтектоїдні сталі 4XB2C, 5XB2C, 6XB2C, а також 4XC і 6XC, що містять 1,0-1,6 % Cr та 0,6-1,6 % Si. Висока в'язкість сталей досягається низьким вмістом в них вуглецю, а також проведенням після гартування більш високого відпуску.

18. Яким вимогам повинні відповідати сталі для штампів гарячого деформування металів, їхні склад та термічна обробка?

У сталях для штампів гарячого деформування повинні забезпечуватися: 1) висока жаротривкість (стійкість проти утворення тріщин при багаторазовому нагріванні та охолодженні);

2) висока жаротривкість; 3) теплопровідність для кращого відведення тепла від робочої поверхні штампа; 4) висока прогартовувальність для міцності по всьому перерізу інструменту.

Для виготовлення молотових штамів, які працюють при позначній тривалості контактування з гарячим металом, використовують хромонікелеві середньовуглецеві сталі 5ХНМ, 5ХНВ. Ці сталі мають добру прогартуваність і високу міцність та в'язкість після гартування з температури 840-860°C і відпуску 450-540°C. Отримується структура сорбіту або троостосорбіту відпуску з твердістю 40-45 HRC.

Середньонавантажений інструмент, що працює з розігріванням поверхні до 600°C, а також інструмент, що працює при 400-500°C, виготовляють зі сталі 4Х5В2ФС. З неї виробляють шиштовхувачі для неглибоких отворів, матриці, різні вставки, інструмент для штамповки важкодеформованих металів, пресформ для лиття під тиском цинкових й алюмінієвих сплавів тощо.

Штамп гарячого пресування працюють у значно важчих умовах, ніж молотові штамп, оскільки вони мають тривалий контакт з гарячим металом. Тому для цих штамів гарячого пресування необхідно застосовувати сталі підвищеної теплостійкості. У деяких випадках для таких штамів застосовують сталі 3Х2В8Ф і 4Х2В5МФ, теплостійкість котрих зберігається до 650°C.

Останнім часом застосовується також сталь 2Х8В8М2К8 замість 3Х2В8Ф. Перша у штампах для пресування високоміцних та нержавіючих сталей має стійкість у 5-15 разів вищу. Зі збільшенням вмісту вольфраму і молібдену зростає теплостійкість сталі, а в'язкість і розгаростійкість зменшуються.

Штамп відпускають на твердість 45-50 HRC. Ножі й пилки відпускають на твердість 48-53 HRC. Твердість пресформ для лиття під тиском - 40-45 HRC. Твердість пресформ для пластмас - від 30 до 56 HRC.

19. Яким вимогам повинні відповідати сталі для вимірювального інструменту, їхній склад та термічна обробка?

Сталі для вимірювального інструменту (плиток, калібрів, шаблонів) повинні мати високу твердість, стійкість проти спрацьовування і зберігати постійність розмірів. Особливо важко забезпечити останню вимогу, оскільки за-

гартована сталь схильна до старіння. Суть старіння полягає в тому, що в об'ємі металу відбувається: а) перерозподіл напружень, які можуть викликати деформацію; б) зменшення тетрагональності мартенситу, що призводить до зменшення об'єму і розмірів; в) перетворення залишкового аустеніту на мартенсит відпуску, що збільшує розміри.

Для виготовлення вимірювального інструменту використовуються високовуглецеві хромисті сталі X (0,95-1,1 % C і 1,3-1,65 % Cr), XBG (0,9-1,05 % C і 0,9-1,2 % Cr) і 12X1 (1,15-1,25 % C і 1,3-1,65 % Cr). Вимірювальний інструмент піддають гартуванню в маслі за якомога нижчої температури, як правило - 840-850°C для сталей X і XBG та 850-880°C для сталі 12X1 з метою одержання мінімальної кількості залишкового аустеніту. Для попередження процесу старіння вимірювальні інструменти піддають тривалому відпуску (12-60 год) при 120-140°C. Твердість після зазначеної обробки становить 62-64 HRC. Іноді після гартування перед відпуском виконують обробку холодом при -50...-80°C для повнішого перетворення залишкового аустеніту.

Вимірювальні скоби, шкали, лінійки, інші плоскі та довгі інструменти виготовляють з листової сталі марок 15, 20, 15X і для отримання робочої поверхні з високою твердістю та зносостійкістю піддають цементації та гартуванню. Можливе використання нітралоїв (38X2МЮА) з азотуванням на високу твердість.

Інструменти також виготовляють з твердих сплавів, які складаються з карбідів тугоплавких металів та кобальтової зв'язки. Виготовляються вони методом порошкової металургії.

20. Які основні властивості твердих сплавів та їхнє маркування?

Характерною особливістю твердих сплавів є висока твердість (87-92 HRC) при високій міцності ($\sigma_{\text{виг}}$ близько 2500 МПа), яка наближається до міцності інструментальних сталей. Вони відзначаються дуже високою зносостійкістю.

Основними твердими сплавами є групи ВК (WC + Co), ТК (WC + TiC + Co) і ТТК (WC + TiC + TaC + Co). Поширеними сплавами групи ВК є сплави марок ВК3, ВК6, ВК20, де число означає вміст кобальтової зв'язки у % (решта - WC). До групи ТК належать сплави марок Т30К6, Т14К8 тощо, де перше число показує вміст TiC у %, друге - Co у %, кількість WC = $100 - \sum (\text{TiC, \%} + \text{Co, \%})$. Група ТТК складається зі сплавів марок ТТ7К12, ТТ8К6, де перше число означає сумарний вміст карбідів TiC та TaC у %, друге - Co у %, кількість WC = $100 - \sum (\text{TiC, \%} + \text{TaC, \%} + \text{Co, \%})$. Сплави з малою кількістю кобальту характеризуються підвищеною твердістю і зносостійкістю, але зниженою міцністю (ВК3, Т30К4), тому їх слід використовувати для чистового точіння. Сплави з підвищеним вмістом кобальту використовують для чорнового точіння (ВК6, ВК8, Т14К8). Стійкість проти спрацювання твердих сплавів зберігається високою при нагріванні до 800-1000°C.

21. Які особливості використання алмазів як матеріалу для виготовлення інструменту?

Сьогодні приблизно 80 % природних алмазів і всі синтетичні алмази застосовуються в техніці як інструментальний

матеріал. Основна кількість алмазів використовується у промисловості у вигляді алмазного порошку для виготовлення ал-

мазно-абразивного інструменту - шліфувальних кругів, притирів, хонів, надфілів тощо для обробки особливо твердих металів і гірничих порід.

Використання алмазних кругів при заточці й доводці твердосплавного інструменту замість заточки кругами з карбіду кремнію і доводки карбідом бору підвищує продуктивність праці у 2-4 рази, а термін служби інструменту - у 2-3 рази. Підвищення стійкості твердосплавного інструменту після алмазної заточки забезпечується високою чистотою (відсутність зазубрин, дрібних тріщин) леза інструменту.

Алмазний інструмент у більшості випадків виготовляється у вигляді кругів з бакелітовою або металевою зв'язкою.

Меншого значення набули алмазні різці (використовуються, як правило, для обробки корпусів годинників), фільєри (для волочіння дроту з високотвердих і дорогоцінних металів) тощо.

22. Які сталі та сплави належать до матеріалів з особливими властивостями?

До матеріалів з особливими властивостями належать сталі та сплави, для яких основною вимогою є забезпечення певного рівня фізичних та хімічних властивостей.

Механічні властивості цих сплавів найчастіше не мають особливого значення. Більшість з них є прецизійними в розумінні високої точності хімічного складу і технології виробництва.

До основних матеріалів цієї групи належать корозійно-стійкі, жаростійкі та жароміцні сталі, тугоплавкі метали та сплави на їхній основі, магнітні та немагнітні сплави, сплави з високим електроопором та заданим значенням коефіцієнта теплового розширення.

Найважливішими корозійно-стійкими технічними сплавами є сталі з підвищеним вмістом хрому. На рис. 5.7 показано вплив кількості хрому в залізохромистих сплавах на електрохімічний потенціал сплаву. Введення в сталь понад 12 % Cr робить її корозійно-стійкою в атмосфері й у багатьох інших промислових середовищах (кислотах, солях, лугах).

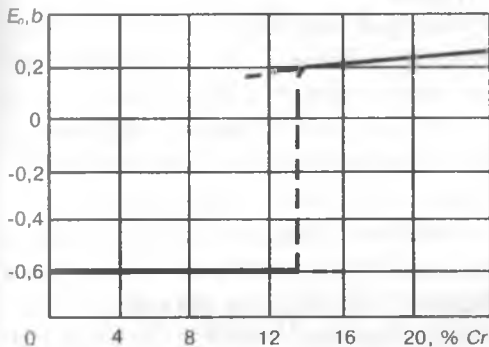


Рис. 5.7. Електрохімічний потенціал залізохромистих сталей

Залежну (0,1-0,15 %) кількість вуглецю (сталі X17, X25, X28), а інколи - незначні добавки титану і нікелю. Титан уводять для подрібнення зерна, а нікель - для поліпшення механічних властивостей.

За структурою сталі 0X13, X17, X25T, X28 належать до феритного класу. Сталі з підвищеним вмістом хрому (17-30 %) не мають фазових перетворень у твердому стані, отже не піддаються гартуванню.

Значним недоліком феритних хромистих сталей є їхня підвищена крихкість, зумовлена крупнокристалічною структурою. Ці сталі схильні до міжкристалітної корозії через збіднення на хром

23. Які найважливіші корозійно-стійкі сталі та їхні властивості?

Найважливішими технічними корозійно-стійкими сталями є хромисті і хромонікелеві.

Використовують три типи *хромистих неіржавіючих сталей*: з 13, 17 і 27 % Cr. Вміст вуглецю в сталях з 13 % хрому може бути від 0,1 до 0,45 % (сталі 0X13, 10X13, 20X13, 30X13, 40X13). Більш високохромисті сталі мають зни-

границь зерен. Міжкристалітна корозія зумовлена тим, що при нагріванні частина хрому біля границь зерна взаємодіє з вуглецем й утворює карбіди. Внаслідок цього концентрація хрому в твердому розчині біля границь зерен стає меншою - 13 % і сталь на цих ділянках отримує негативний електрохімічний потенціал. Для зменшення корозії до складу сталей вводять невелику кількість титану як інтенсивнішого за хром карбідоутворюючого елемента.

З феритних сталей виготовляють обладнання азотно-кислотних заводів (ємкості, труби).

Сталі з підвищеним вмістом вуглецю (10X13, 20X13, 30X13, 40X13) є мартенситними сталями. Після гартування і відпуску при 180-250°C сталі 30X13, 40X13 мають твердість до 50-60 HRC й використовуються для виготовлення хірургічного інструменту, пружин для роботи при температурах до 400-450°C, карбюраторних голок, предметів побутового призначення.

Хромонікелеві сталі аустенітного класу в рівноважному та наклепаному стані й при високих температурах мають вищі механічні властивості та корозійну стійкість, ніж хромисті сталі.

За хімічним складом хромонікелеві сталі є високолегованими. Переважно застосовуються сталі, що містять 18 % Cr і 9-10 % Ni. Сталі марок X18N9, 12X18N9T, 17X18N9 належать до аустенітного класу. Для зменшення витрат дефіцитного нікелю частину його в аустенітних сталях замінюють марганцем (сталь 10X14Г14Н3Т). З цією ж метою до складу сталей вводять азот (0,15-0,4 %), наприклад сталь марки 10X14АГ15.

Для зменшення схильності до міжкристалітної корозії в сталь вводять титан або зменшують кількість вуглецю (менше 0,04 %).

З усіх неіржавіючих сталей найбільше використовуються аустенітні неіржавіючі сталі. Вони мають високі антикорозійні властивості, міцність ($\sigma_T = 800$ МПа), пластичність ($\delta = 40-50$ %, $\Psi = 50-60$ %), добру зварюваність.

Термічна обробка аустенітних сталей полягає в гартуванні в температур 1000-1050°C у воду. При нагріванні має місце розчинення карбідів хрому в аустеніті. Охолодження відбувається дуже швидко, карбіди хрому з аустеніту при цьому не виділяються. Увесь хром залишається в твердому розчині, й корозійна стійкість сталі зберігається високою.

Загартована аустенітна сталь набуває підвищеної пластичності. Для зміцнення аустенітної сталі проводиться її деформування при кімнатних температурах, що викликає ефект наклепу. Поріг текучості σ_T при цьому може досягати 1000-1200 МПа, поріг міцності σ_B - 1200-1400 МПа. Оброблюваність різанням аустенітних сталей низька.

Особливу групу складають *аустенітно-мартенситні неіржавіючі сталі* типу 09X15H8Ю ($< 0,09\% \text{ C}$, $14-16\% \text{ Cr}$, $7-9\% \text{ Ni}$, $0,7-1,3\% \text{ Al}$), які піддаються інтенсивному зміцненню гартуванням і старінням при 450-500°C (виділяються дисперсні частинки Ni_3Al). Властивості сталі після термообробки $\sigma_B = 1200 \text{ МПа}$, $\sigma_T \approx 950 \text{ МПа}$.

Для отримання особливо корозійностійких матеріалів аустенітні сталі додатково легують міддю або міддю з молібденом (сталь 0X23H28M3Д3Т). Досить високу корозійну стійкість мають сплави на нікелевій основі - хастелой ($80\% \text{ Ni} + 20\% \text{ Mo}$).

Широко застосовуються хромонікелеві сталі аустенітного класу в хімічній та харчовій промисловості.

Жаростійкими називають сталі й сплави, поверхневі шари яких мають високу стійкість проти хімічного руйнування в газових середовищах при температурах, що перевищує 500°C.

Ступінь окислення металу зумовлюється температурою поверхні виробу. Так, при нагріванні до 450°C сталь практично не окислюється (рис. 5.8), при нагріванні до 650°C відбувається значне окислення, а при температурі понад 700°C - інтенсивне

24. Що таке жаростійкі сталі, вимоги до них та їхні основні властивості?

окислення. Внаслідок взаємодії заліза з киснем утворюється в'юстит (FeO), магнетит (Fe_3O_4) і гематит (Fe_2O_3). Рихлий оксид FeO є основним шаром жаровини й утворюється при 570°C .

Для захисту виробів від жаровини сталь легують хромом, алюмінієм або кремнієм, які мають більшу спорідненість з киснем, ніж залізо, внаслідок чого на поверхні виробів утворюються щільні

оксида - Cr_2O_3 , Al_2O_3 або SiO_2 , які перешкоджають проникненню кисню і захищають поверхні виробів від окислення.

Жаростійкі сталі за структурою поділяються на феритні (суто хромисті) 12Х17, 15Х25Т та аустенітні (хромонікелеві) 12Х18Н9, 10Х23Н18, 12Х25Н16Г7АР, ХН32Т, 15Х25Н19С2Л тощо.

Мінімальний вміст хрому, що забезпечує жаровиностійкість для різних робочих температур, складає: при температурі 900°C сталь (сплав) повинна

Рис. 5.8. Швидкість окислення сталі залежно від температури

вміщувати не менше 10 % Cr, а при температурі 1100°C - не менше 20-25 % Cr.

25. Що таке жароміцні сталі та сплави, вимоги до них та їхні основні властивості?

лі залежить від тривалості дії на неї навантаження при підвищених температурах. Деформацію зразка або деталі під дією постійного за величиною навантаження при певних температурах називають *повзучістю*. Повзучість є причиною руйнуван-

Жароміцними називаються сталі й сплави, здатні тривалий час працювати при високих температурах під дією значних навантажень. Жароміцність сталі

ни матеріалу. *Поріг повзучості* σ_p - це напруження, що створює задану швидкість деформації при даній температурі. При нагріванні до 300°C повзучості не спостерігається, тому й необхідності у застосуванні спеціальних жароміцних сталей або сплавів у температурних умовах до 300°C немає. На рис. 5.9 показано типову криву повзучості матеріалу.

Тривала міцність σ_{tr} характеризує жароміцність матеріалу за певний підрізок часу і є напруженням, що викликає руйнування при даній температурі через певний проміжок часу.

Підвищення жароміцності досягається: легуванням твердого розчину, що призводить до збільшення енергії зв'язку між атомами; створенням у сплаві спеціальної структури, що складається із вкраплених в основний твердий розчин і по границях зерен дисперсних карбідних і особливо інтерметалідних фаз, які когерентно тривалий час з'єднані з матрицею. Рівномірно розподілені дисперсні надлишкові фази уповільнюють пластичну деформацію при високих температурах.

Жароміцні сталі і сплави повинні, крім того, мати високу жаростійкість.

Жароміцні сталі застосовуються при робочих температурах 500-750°C. При температурах до 600°C частіше використовують сталі на основі α -твердого розчину, а при більш високих температурах - на основі γ -твердого розчину, що мають вищу жароміцність.

За структурою жароміцні сталі поділяються на перлітні, мартенситні, аустенітні, мартенситно-феритні та феритні.

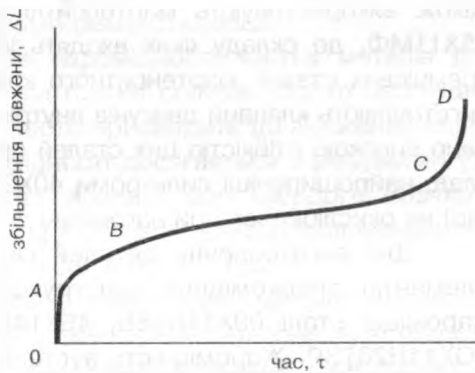


Рис. 5.9. Типова крива повзучості матеріалу

Котли та їхнє обладнання виготовляють з низьковуглецевих сталей перлітного класу 16M, 15XM, 12X1MФ, вміст хрому, молібдену і ванадію в яких дорівнює або переважає 1,0 % кожного елемента; мартенситно-феритного класу 15X11MФ, 15X12BHMФ.

Для деталей і вузлів газових турбін і паросилових установок також використовують мартенситні складнолеговані сталі типу 15X11MФ, до складу яких входять W, V, Mo, Nb, Ti. З хромокремнієвих сталей мартенситного класу, так званих сильхроми, виготовляють клапани двигунів внутрішнього згоряння, що зумовлено високою стійкістю цих сталей проти окислення. Так, наприклад, найпоширеніші сильхроми 40X9C2 та 40X10C2M (0,7-0,9 % Mo) не окислюються при нагріванні до 800°C

Для виготовлення деталей газотурбобудування, зварних елементів високоміцних конструкцій застосовують аустенітні жароміцні сталі 09X14H16Б, 45X14H14B2M, 40X15H7Г7Ф2МС, 10X11H20ТЗР. Жароміцність аустенітних сталей, що працюють при 500-750°C, вища, ніж перлітних, мартенситних і феритних.

Жароміцні сплави на нікелевій основі (німоники) марок ХН77ТЮР, ХН70ВМТЮ, ХН55ВМТКЮ також широко застосовуються у промисловості для виготовлення турбінних дисків, кілець, робочих і соплових лопаток та інших деталей газових турбін, що працюють при 650-850°C.

25. Які метали належать до тугоплавких?

Основними матеріалами, які можуть працювати при температурах вище 1000°C, є тугоплавкі метали і сплави на їхній основі. До тугоплавких відносять метали, температура плавлення яких вища за температуру плавлення заліза (1539°C). Найбільше застосування в техніці мають такі тугоплавкі метали, як ніобій, молібден, хром, тантал та вольфрам з температурою плавлення відповідно 2468°C, 2625°C, 1875°C, 2996°C і 3410°C.

Інтерес до тугоплавких металів і сплавів різко зріс у зв'язку з будівництвом ракет, космічних кораблів, атомних реакторів і розвитком енергетики.

Тугоплавкі метали та їхні сплави використовують в основному як жароміцні. Висока жароміцність таких металів зумовлена значними силами міжатомних зв'язків у кристалічній ґратці металу і високими температурами рекристалізації.

Додаткове підвищення жароміцності чистих металів досягається створенням на їхній основі сплавів. Проте необхідно враховувати, що легування часто призводить до зниження пластичності. Підвищення жароміцності досягається в результаті утворення легованого твердого розчину або твердого розчину, який додатково зміцнюється дрібнодисперсними виділеннями на зразок карбідів ZrC , $(Ti, Zr)C$, оксидів (ZrO_2) тощо.

Широкого застосування з тугоплавких металів одержали молібден та ніобій, які мають задовільні технологічні властивості. Ці метали характеризуються доволі низькою температурою окрихчення від $+100$ до $-100^\circ C$, високою корозійною стійкістю, зокрема в кислотах і лугах.

Вольфрам має максимальну температуру плавлення і рекристалізації, тому його використовують для виготовлення деталей, що працюють при температурах вище $1600^\circ C$ і навіть вище $2200^\circ C$. Вольфрам і молібден у чистому вигляді застосовують в радіо- й електронній промисловості (листові аноди, сітки, пружини катодів, нагрівачі, контакти тощо), у хімічному машинобудуванні, скляній промисловості тощо.

Великим недоліком тугоплавких металів є їхня низька жаростійкість (у тисячі разів нижча, ніж у сталі 12X18H9T). Тому їх при температурах $600-800^\circ C$ необхідно захищати від окислення. Для захисту від окислення розроблені металеві, інтерметалеві й керамічні покриття. Для молібдену і вольфраму кращими вважаються термодифузійні силіцидні покриття ($MoSi_2$, WSi_2).

27. Які сталі та сплави є стійкими проти спрацювання, вимоги до них та їхні основні властивості?

Можливість тривалої експлуатації деталей машин та інших виробів, їхня довговічність у більшості випадків пов'язані зі стійкістю проти спрацювання матеріалів, з яких вони виготовлені.

Спрацювання можна охарактеризувати як процес зміни розмірів, форми, маси або стану поверхневого шару під впливом зовнішнього середовища. Розрізняють такі види спрацювання: абразивний, кавітаційний, ударно-абразивний, корозійно-механічний, ерозійний тощо.

Механізм спрацювання різний і залежить від умов тертя, але в основному він полягає в тому, що з поверхні металу під впливом навантажень вибиваються дрібні частинки. У випадку звичайного тертя поверхня металу наклепується і опір стиранню зростає. Отже, у даному випадку здатність металу до наклепу суттєво визначає його зносостійкість. У випадку абразивного зношування, коли тверді частинки абразиву (наприклад, піску) вибивають дрібні частки металу, стійкість проти спрацювання визначатиметься опором металу крихкому руйнуванню і його твердістю.

В агресивних середовищах опір спрацюванню залежить і від корозійної стійкості матеріалу. Тому зносостійкість сталі (сплаву) визначається його фізико-хімічними властивостями й умовами зношування. Залежно від умов спрацювання оптимальна структура і властивості металу можуть бути різними.

Стійкість проти абразивного спрацювання зростає з підвищенням твердості матеріалу, що зношується, але для різних матеріалів по-різному, тому ефективним підвищенням зносостійкості є поверхневе гартування або інші методи підвищення поверхневої твердості (цементація, азотування тощо). За однакової поверхневої твердості сталі, у структурі яких є мартенсит та карбіди, мають більшу зносостійкість, ніж сталі з такою самою твердістю, що не мають надлишкових карбідів.

За однакової твердості сталь, що має крупнокристалічну структуру, має меншу зносостійкість, ніж сталь з дрібнокристалічною структурою, бо у першій опір крихкому руйнуванню менший.

Вкраплення графіту, що погіршують механічні властивості сталі, підвищують зносостійкість при терті. У процесі зношування графітні вкраплення виходять на поверхню тертя, руйнуються по площинах спайності (шарувата структура), утворюють дуже тонкі пластинки і заповнюють нерівності поверхонь, що труться, запобігаючи сухому тертю металу по металу і схоплюванню. Отже, графітні вкраплення виконують функції мастила.

Таким чином, залежно від умов експлуатації, застосовуються різні за складом, структурою та властивостями матеріали (наприклад, графітізовані та високомарганцеві сталі, наплавочні матеріали тощо).

Графітізовані сталі. До цієї групи належать сталі ЭИ293, ЭИ336, ЭИ366, що характеризуються високою стійкістю проти спрацювання. Графіт до їхніх структур потрапляє внаслідок часткового розкладання цементиту. Тому графітізовані сталі мають високий вміст вуглецю і кремнію (як легуючі домішки), які підвищують здатність сталі до графітізації (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Склад графітізованих сталей, %

Марка сталі	C	Si	Mn	Інші елементи
ЭИ 293	1,5-1,75	0,75-0,95	0,20-0,40	–
ЭИ 336	1,50-1,70	0,70-1,00	0,15-0,40	0,4-0,7
ЭИ 366	1,30-1,45	1,60-1,25	0,40-0,50	0,2-0,4

У литому стані ці сталі мають структуру пластинчастого перліту з надлишковими карбідами (часто вони мають вигляд сітки). Для отримання необхідної кількості графіту проводять

графітизуючий відпал, у результаті якого структура сталі складається із зернистого перліту з деякою кількістю дрібних графітних вкраплень і має кращу оброблюваність.

Деталі з графітизованої сталі можна використовувати у відпаленому стані та після гартування з відпуском.

Відпалена графітизована сталь у нормалізованому стані міцніша за високоміцний чавун і звичайну конструкційну вуглецеву сталь, поступаючись останній у пластичності:

	σ_b , МПа	δ , %
Графітизована сталь.....	800	5
Сталь 50	600	20
Високоміцний чавун	400	10

Термічно оброблену графітизовану сталь використовують для виготовлення холодних штамів, калібрів, траків та інших деталей, які у процесі роботи зазнають значного тиску. У відпаленому стані графітизовану сталь використовують як заміник кольорових металів - латуні та бронзи.

Високомарганцеві сталі.

Для виготовлення деталей, що працюють на зношування в умовах абразивного тертя і високих питомих навантажень та ударів (наприклад, траки машин, деталі каменедробарок, трамвайні хрестовини, черпаки екскаваторів тощо) застосовуються сталі аустенітного класу. Характерною особливістю цих сталей є схильність до інтенсивного наклепу структурно нестійкого аустеніту з утворенням мартенситу деформації (рис. 5.10).



Рис. 5.10. Мікроструктура сталі 110Г13Л після наклепування, $\times 200$

Незамінним матеріалом для виготовлення деталей, що працюють одночасно на удар і зношування, є так звана сталь Гадфільда (110Г13Л), яка містить

Металеві матеріали машинобудування

1,2 % С і 13 % Мп. Найкращим співвідношенням вмісту С і Мп вважається 1:10. Структура цієї сталі після лиття складається з аустеніту і надлишкових карбідів $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, що виділяються по границях зерен, в результаті чого знижується міцність і в'язкість сталі. Для одержання аустенітної структури сталь гартують з температури нагріву 1050-1100°C. При цьому вся карбідна фаза сталі розчиняється в аустеніті й гартування у воді фіксує чисто аустенітну структуру. Сталь 110Г13Л в загартованому стані характеризується такими механічними властивостями: $\sigma_{\text{в}} = 800-1000$ МПа; $\sigma_{\text{т}} = 350-400$ МПа; $\delta = 25-35$ %; $\Psi = 30-40$ %; КСЧ = 200 Дж/см².

Основною характерною властивістю сталі Гадфільда є те, що при низькій твердості (180-220 НВ) вона має надзвичайно високу зносостійкість при терті з тиском і ударами. Це пояснюється підвищеною здатністю до наклепу (рис. 5.11), значно більшою, ніж у звичайних сталей з такою ж твердістю. Тому, якщо експлуатація деталі відбувається в умовах значних питомих навантажень і ударів, то твердість сталі підвищується завдяки наклепу й перетворення аустеніту на мартенсит деформації, що збільшує опір спрацюванню. З цієї причини сталь 110Г13Л погано обробляється різанням і тому її використовують в литому стані або після гарячої обробки тиском. Якщо ж під час роботи сталь зазнає лише абразивного зношування і відсутні значні навантаження, що викликають наклеп, тоді не спостерігається підвищення зносостійкості, бо при цьому не розвивається мартенситне перетворення.

Наплавочні матеріали. З метою суттєвого підвищення зносостійкості, а також відновлення розмірів зношених деталей проводять наплавку на ті поверхні деталей, які піддаються спрацюванню. У цьому випадку наплавляються заздалегідь заготовлені у вигляді прутків (трубок) наплавочні сплави, що розплавляються киснево-ацетиленовим полум'ям або вольтовою дугою і в рідкому або напіврідкому стані наносять на поверхню деталі.

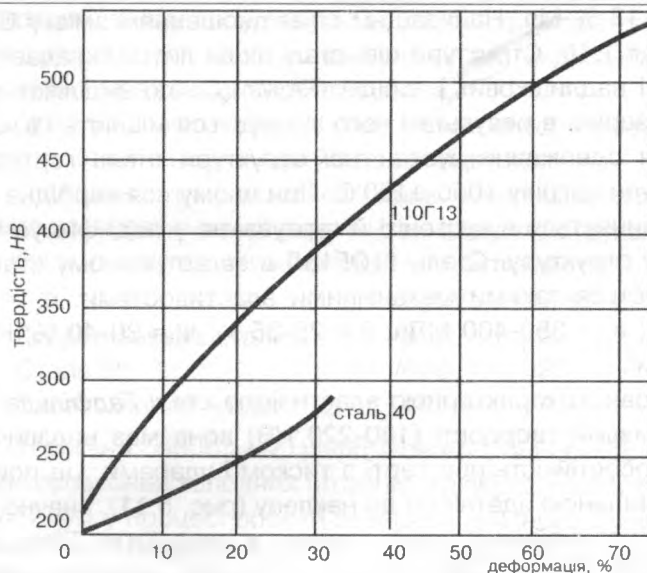


Рис. 5.11. Вплив наклепу на твердість вуглецевої сталі 40 і сталі 110Г13Л

Як наплавки використовують досить тверді і тому дуже зносостійкі матеріали, наприклад, порошкову суміш карбідів W_2C + WC евтектичного складу з температурою плавлення сплаву $2525^{\circ}C$. Наплавлений шар складається з заліза із вкрапленнями карбідів вольфраму. Цей наплавочний матеріал переважає за твердістю та зносостійкістю решту наплавочних матеріалів, але водночас характеризується високою крихкістю. Поріг міцності при згині складає всього 300-500 МПа (при розтягуванні - наближається до нуля).

Випускають ці наплавочні матеріали під загальною назвою «реліт», і різні марки його відрізняються дисперсністю карбідного порошку.

Крім того, промисловість виготовляє також прутки із залізохромонікелевого сплаву, який використовують як наплавочний матеріал (так званий сормайт). Залежно від складу сплаву розрізняють сормайт 1: (3,0 % C; 30 % Cr; 5 % Ni; 3 % Si), решта -

залізо і сормайт 2: (1,7 % C; 15 % Cr; 2 % Ni; 2 % Si; решта - залізо). Перший сплав твердіший, але більш крихкий (50 і 40 HRC відповідно), що і визначає вибір сплаву для наплавки.

Для наплавки використовують також механічну суміш подрібнених ферохрому, феромарганцю, чавуну і вугілля. Після їхнього розплавлення і нанесення на поверхню виробу утворюється сплав, до складу якого входять 10 % C; 20 % Cr; 15 % Mn; 3 % Si, решта - залізо. Його структура складається з аустеніту і значної кількості карбідів. Сплав має високу твердість (більше 65 HRC).

Широко застосовують електродугову наплавку, під час якої електрод, виготовлений із заліза або сталі, змащують різними компонентами, які наплавляють на деталь. При цьому утворюються сплави, різні за складом і структурою.

Розрізняють три групи магнітних сталей і сплавів: магнітнотверді, магнітном'які та немагнітні.

Магнітнотверді сплави характеризуються великим

значенням коерцетивної сили H_c , а *магнітном'які* - малим її значенням. H_c визначається напруженістю поля, яку треба прикласти до зразка, щоб його розмагнітити. Одиницею вимірювання H_c є ампер на метр (А/м).

З магнітнотвердих сплавів виготовляють в основному постійні магніти, а з магнітном'яких - осердя трансформаторів, що зазнають змінного намагнічування. До магнітнотвердих сплавів належать сталі EX, EX3, EXB6, EX5K5, EX9K15M, які для надання їм високих магнітних властивостей піддають складній термічній обробці. Виготовляють сталінні магніти куванням.

Другу групу магнітнотвердих сплавів складають ливарні сплави типу алні АН, алніко АНК, магніко МНК. Сплави містять 13-33 % Ni, 9-15 % Al, 12-24 % Co (залежно від марки).

28. Які сталі та сплави належать до магнітних, їхній склад, маркування, властивості?

Для виготовлення магнітнотехнічних матеріалів застосовують технічно чисте залізо або, в окремих випадках, сплави із заліза, нікелю і кобальту. H_c технічно чистого заліза марок Э, ЭА, ЭАА відповідно дорівнює 96, 84 і 64 А/м. Технічно чисте залізо застосовують для виготовлення реле та електромагнітів постійного струму, магнітних екранів, полюсів електричних машин, а електротехнічну сталь, що є сплавом заліза та кремнію з обмеженим вмістом інших домішок, - для виготовлення осердь трансформаторів, магнітопроводів електричних машин та апаратів змінного і постійного струму.

Маркування електротехнічної сталі відрізняється від звичайної. Перша цифра визначає структуру і вид прокатування: гарячекатана ізотропна (1), холоднокатана ізотропна (2) та холоднокатана анізотропна із ребровою текстурою в напрямленні [100] (3). Друга цифра вказує вміст у сталі кремнію: 0-до 0,4 %, 1-0,4-0,8 %, 2 -0,8-1,8 %, 3-1,8-2,8 %, 4-2,8-3,8 %, 5-3,8-4,8 %. Третя цифра визначає витрати на гістерезис та теплові втрати. Четверта - код числового значення параметру, що нормується. Наприклад, високі питомі втрати має гарячекатана ізотропна сталь марок 1212, 1311, 1411, 1511, 1514. Тоді як питомі втрати у холоднокатаній ізотропній електротехнічній сталі марок 2011, 2012, 2013 тощо нижче, ніж у гарячекатаних.

Для приладів, що працюють у слабких магнітних полях (радіо, телефон, телеграф), застосовують залізонікелеві сплави, які називають *пермалоїми* і *гайперниками*. Серед них розрізняють: низьконікелеві пермалої 45Н, 50НП, 60НХС (40-65 % Ni, решта Fe), з підвищеною магнітною проникністю та високонікелеві пермалої 79 НМ, 81 НМА (78-80 % Ni), з дуже високою магнітною проникненістю в слабких полях. Пермалої виготовляють з високої чистоти заліза та нікелю вакуумною переплавною. Їх піддають складній термічній обробці при 1100-1300°C в середовищі водню (вакуумі) з наступним охолодженням з певною швидкістю. Сплави, які містять 45-50 % Ni (гайперники),

застосовують без термічної обробки. У техніці, крім перелічених, широко використовуються й більш складні сплави.

Немагнітні сталі застосовують для виготовлення бандажних кілець та інших деталей різних машин і приладів. Раніше для цього використовували кольорові метали (латунь, бронзу). Сьогодні широко застосовують немагнітні (парамагнітні) аустенітні сталі 12Х18Н9, 55Г9Н9Х3, 50Г18Х4. Аустенітна структура в цих сталях досягається гартуванням, а для зміцнення сталі її піддають наклепу.

Досить поширеними парамагнітними матеріалами є ферити. Їх одержують спіканням порошків, що складаються з Fe_2O_3 , і оксидів двовалентних металів (ZnO , NiO , MnO тощо). Специфічними властивостями феритів порівняно із звичайними феромагнетиками є високий електричний опір (що призводить до малих втрат при високих частотах) і відносно невисока намагніченість насичення.

Ферити використовують для роботи при високих і надвисоких частотах, де металеві феромагнетики непридатні через значні втрати електромагнітної енергії. Їх застосовують у радіоелектроніці й радіотехніці для магнітних стрижневих антен, осердь магнітних підсилювачів, в імпульсних трансформаторах тощо. Ферити забезпечили мініатюризацію важливих вузлів сучасних приладів.

Високий електроопір сплавів може бути досягнутий, якщо їхня структура - твердий розчин. За правилом Курнакова, при утворенні твердих розчинів електроопір зростає, досягаючи мак-

симального значення при певному для кожної системи вмісті. Застосовуються ці сплави для виготовлення реостатів (так звані реостатні сплави) і для нагрівальних елементів різних електричних приладів та електричних печей (сплави високого електроопору).

29. Які основні властивості сталей та сплавів з високим електроопором та де їх використовують?

Як реостатні застосовуються сплави системи Cu-Ni-Mn (~ 40-45 % Ni; ~ 1-2 % Mn; решта - Cu): манганін (МНМц 3-12), константан (МНМц 40-1,5), копель (МНМц 43-0,5). Ці сплави мають електроопір порядку 0,5 Ом·мм²/м, який практично не залежить від температури. Максимальна робоча температура цих сплавів 500°C.

Сплавами з високим електроопором для нагрівальних елементів є маловуглецеві сталі феритного класу, леговані хромом і алюмінієм: Х13Ю4 (фехраль), ОХ25Ю5 (хромаль), ОХ27Ю5А і сплави на основі нікелю і хрому: ніхром Х20Н8О і фероніхром Х15Н60 з робочою температурою 950-1200°C.

30. Які сплави характеризуються особливими тепловими і пружними властивостями?

Сплави з особливими тепловими і пружними властивостями - це метали із заданим коефіцієнтом теплового розширення, які широко застосовують у приладобудуванні.

Щоб досягти заданих коефіцієнтів лінійного розширення, сплавляють кілька металів. Якщо ці елементи утворюють механічні суміші, то коефіцієнти лінійного розширення змінюються адитивно (пропорційно). При утворенні твердих розчинів коефіцієнти лінійного розширення змінюються за криволінійною залежністю в границях, обмежених значеннями коефіцієнтів розширення чистих компонентів.

У промисловості широко застосовують такі сплави: інвар (Н36) з коефіцієнтом лінійного розширення $1,5 \cdot 10^{-6}$ при температурному інтервалі від -80 до +100°C; суперінвар (Н31К6) з коефіцієнтом лінійного розширення $1,0 \cdot 10^{-6}$ і температурним інтервалом від +20 до +60°C; платиніт (Н48) з коефіцієнтом лінійного розширення $9 \cdot 10^{-6}$ і температурним інтервалом від -20 до +300°C.

З цих сплавів в основному виготовляють деталі приладів, розміри яких не повинні змінюватися в інтервалі вказаних температур. Коефіцієнт лінійного розширення платиніту такий са-

ний, як у скла та платини, тому цей сплав застосовують для пакування різних деталей зі склом.

Пружини точних приладів виготовляють з металів, модулі пружності яких не змінюються при змінах температури. Цим вимогам відповідають сплави з нікелю, хрому і заліза. Температурний коефіцієнт модуля пружності цих сплавів приблизно у 10 разів менший, ніж у вуглецевої сталі, і у 20 разів менший, ніж в аустенітної сталі. До таких сплавів належить елінвар (ЭИ25) із вмістом 37 % Ni; 8 % Cr; 0,4 % C; 0,5 % Si; 0,4 % Mn; 0,03 % S і 0,04 % P. Модуль нормальної пружності - $16 \cdot 10^3 + 17 \cdot 10^3$. Аналогічні властивості мають елінвар (ЭИ574), сплав H35XMB та інші.

Сьогодні кольорові метали та сплави на їх основі повинні в основному замінити сплави на основі заліза. Така заміна спричинена значними збитками від корозії (до 30 % річного виробництва чавуну та сталі), витратами на ремонтні роботи, особливо на транспорті.

Основними кольоровими сплавами, що застосовуються у машинобудуванні вважаються сплави на основі легких металів: титану, магнію, алюмінію (дюралюміні, силуміні). Широко використовуються сплави на основі цинку, свинцю, олова, міді (латуні, бронзи). На основі кольорових металів створюються композиційні матеріали (КМ), а також матеріали, що виготовляються методами порошкової металургії.

Густина чистого алюмінію - $2,7 \text{ г/см}^3$, температура плавлення - 657°C . Прокатаний і відпалений алюміній високої чистоти має $\sigma_b = 60 \text{ МПа}$, модуль пружності $E = 7 \times 10^3 \text{ МПа}$, $\delta = 50 \%$, $\Psi = 85 \%$, твердість 25 НВ.

Алюміній - високопластичний і маломіцний метал, тому як конструкційний матеріал його не застосовують. Параметр гране-

31. Які кольорові метали і сплави застосовують у машинобудуванні?

32. Які властивості сплавів алюмінію та де їх застосовують?

центрованої ґратки алюмінію при 20°C дорівнює 4,04Е; атомний радіус - 1,43Е. Алюміній не має алотропічних модифікацій. Йому притаманні високі тепло- й електропровідність та значна захована теплота плавлення. Цей метал стійкий проти корозії на повітрі та у деяких інших середовищах, що зумовлено утворенням щільної плівки Al_2O_3 на його поверхні, яка й захищає метал від корозії. Постійними домішками у чистому алюмінії є залізо і кремній. Вміст цих елементів знижує його пластичність.

Мідь розчиняється в алюмінії при кімнатній температурі у кількості близько 0,2 %, а при 548°C - до 5,7 % (рис. 5.12). При нагріванні сплаву міді з алюмінієм до 500°C вторинні кристали сполуки CuAl_2 можна перевести в однофазний стан з утворенням твердого розчину. Утворений таким чином твердий розчин при вмісті в ньому понад 0,2 % міді є перенасиченим, його можна зафіксувати швидким охолодженням у воді або іншому середовищі.

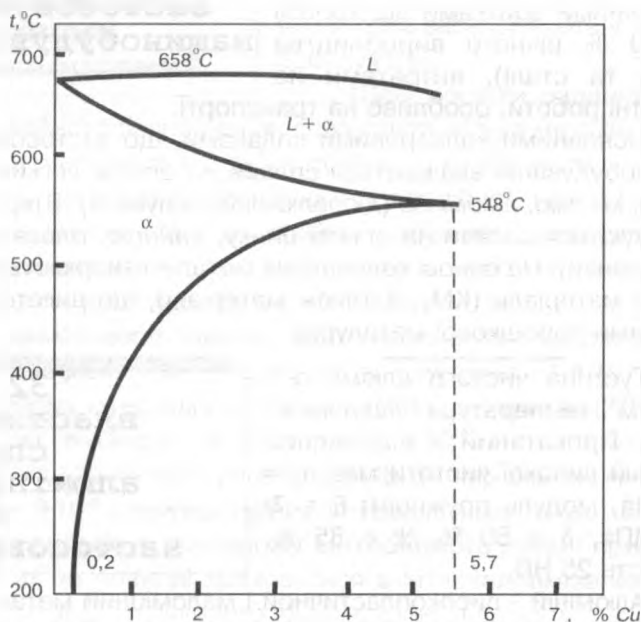


Рис. 5.12. Діаграма стану Al-Cu

Твердий розчин міді в алюмінії, зафіксований гартуванням, нестійкий. У загартованому дюралюмінії відбуваються зміни, які призводять до виділення CuAl_2 . У розчині залишається лише 0,2 % міді, що відповідає зрівноваженій системі. Цей процес називають старінням. Старіння алюмінію може відбуватися при кімнатній температурі (природне старіння) і при нагріванні до 200°C (штучне старіння).

Таким чином, термічна обробка алюмінієвих сплавів складається з двох циклів - гартування і старіння. На рис. 5.13 видно, що початковий період обробки алюмінієвих сплавів характеризується незначним підвищенням міцності. В цей період дюралюміній пластичний і деталь протягом 2-3 год можна піддавати різним технологічним операціям (згинати, відбортювати, розклепувати тощо). Після інкубаційного періоду пластичність дюралюмінію різко зменшується, а міцність збільшується. При природному старінні ($t = 20^\circ\text{C}$) вона досягає максимуму через 4-5 діб.

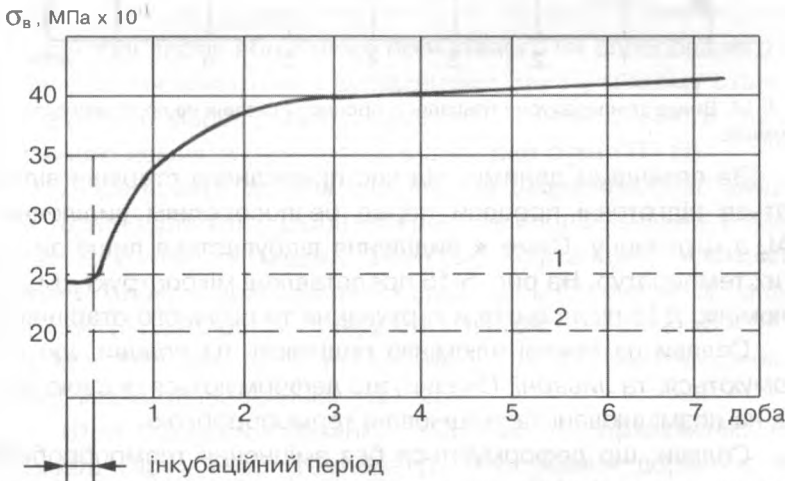


Рис. 5.13. Зміна міцності при природному старінні алюмінієвого сплаву: 1 - загартований стан, 2 - відпалений стан

На рис. 5.14 зображено криві старіння дюралюмінію при нагріванні його до різних температур. При нагріванні до 200°C старіння завершується через кілька годин, але при значному витримуванні міцність алюмінію зменшується, відбувається так зване знеміцнення. При мінусових температурах процес старіння триває значно довше, ніж при кімнатній температурі.

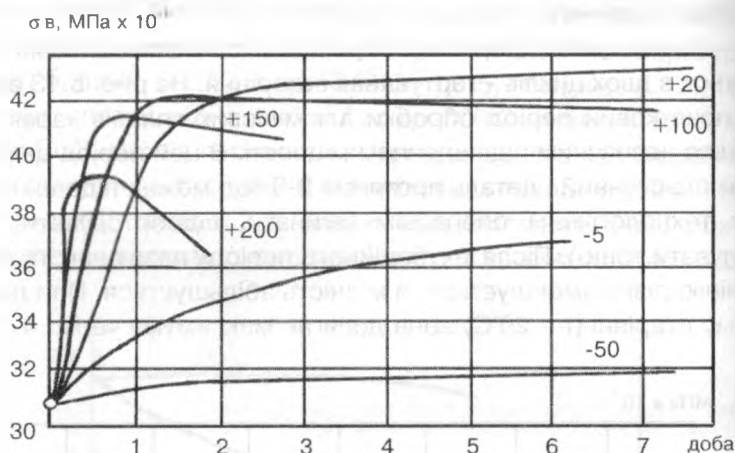


Рис. 5.14. Вплив температури і тривалості процесу старіння на поріг міцності дюралюмінію

За останніми даними, під час природного старіння відбуваються підготовчі процеси перед безпосереднім виділенням CuAl_2 з α -розчину. Саме ж виділення відбувається лише за високих температур. На рис. 5.15 представлені мікроструктури дюралюмінію Д16 після лиття й гартування та штучного старіння.

Сплави на основі алюмінію поділяють на *сплави, що деформуються, та ливарні*. Сплави, що деформуються, у свою чергу, - на *знеміцнювані та зміцнювані термообробкою*.

Сплави, що деформуються без зміцнення термообробкою мають невисоку міцність, але високу пластичність і протикорозійну стійкість АМц(1-1,6 % Мп), АМг3(3,2-3,8 % Мг), АМг5(4,8-5,8 % Мг). З цих сплавів виготовляють деталі методом штампування.

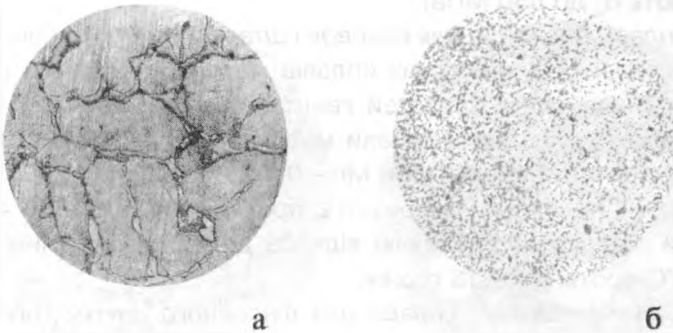


Рис. 5.15. Мікроструктура дюралюмінію D16 після: а - лиття (х150), б - гартування і штучного старіння (х200)

Сплави алюмінію з марганцем і з магнієм мають більшу міцність і протикорозійну стійкість, ніж чистий алюміній. Ці сплави у вигляді листів або іншого прокатаного чи спресованого матеріалу застосовують як у відпаленому, так і у м'якому стані (до позначення їх марок додають букву М), після незначного наклепу і сильного наклепів (додаються відповідно букви П і Н).

Дюралюміній та інші сплави, що деформуються, зміцнюювані термообробкою. Дюралюміній - найпоширеніший у техніці сплав алюмінію з міддю, магнієм, марганцем, кремнієм і залізом. Слово дюралюміній у перекладі з французької означає твердий (франц. *durte* - твердість). Він містить близько 4 % Cu, 1 % Mg, 1 % Mn, незначну кількість Fe і Si. Найпоширеніші у техніці марки дюралюмінію - Д1, Д16.

Щоб підвищити механічні властивості дюралюмінію, його піддають гартуванню (температура гартування дорівнює 485-505°C) і природному старінню.

Алюмінієві сплави з додаванням цинку (крім міді та магнію) мають вищу міцність і називаються *високоміцними* (сплави В95, В96 мають σ_b до 650 МПа).

Сплави алюмінію для поковок і штампування. При виготовленні деталей з алюмінієвих сплавів методом кування і штампування (наприклад, лопастей гвинта, картерів двигунів тощо) застосовують алюмінієві сплави марок АК6, АК8, які містять (в %): Cu - 1,8-4,8; Mg - 0,3-0,8; Mn - 0,4-0,8; Si - 0,5-1,2; Fe - 0,8. Поковки і штамповки одержують при температурі 380-450°C. Поковки піддають гартуванню від 500 до 575°C і старінню при 150-165°C протягом 6-15 годин.

Силуміни та інші сплави для фасонного лиття. Типовими ливарними алюмінієвими є сплави системи Al-Si - силуміни (10-13 % Si), з яких в авто- і авіабудівництві виготовляють литі деталі. Введення в силуміни Mg, Cu сприяє ефекту зміцнення при старінні; Ti, Zr подрібнюють зерно; Mn поліпшує протикорозійні властивості; Ni, Fe підвищують жаростійкість.

Значного зміцнення силумінів досягають модифікуванням рідкого металу сумішшю солей $2/3 \text{ NaF} + 1/3 \text{ NaCl}$. Структура сплавів без модифікування (рис. 5.16,а) складається з голчастих кристалів Si і евтектики ($\alpha + \text{Si}$). Після модифікування структура сплаву: $\alpha + \text{евтектика} (\alpha + \text{Si})$, при цьому евтектика одержує тонку будову, що призводить до значного підвищення механічних властивостей виливка (рис. 5.16,б).

Існує багато ливарних сплавів алюмінію різного складу, які маркуються від АЛ1 до АЛ33. У позначенні марок силумінів буква А означає, що це сплав алюмінієвий, Л - що він ливарний, цифри - порядковий номер сплаву. Деталі, що працюють зі значними навантаженнями, необхідно виготовляти з ливарних сплавів у тих випадках, коли їх через складність форми не можна виготовити методом кування чи штампування.

Жароміцні сплави алюмінію. Деталі, що працюють при температурах 200-350°C (наприклад, поршень, головка, циліндр тощо), виготовляють з алюмінієвого жароміцного сплаву, що де-

Металеві матеріали машинобудування

формується АК4-1, який вміщує (%): Cu - 1,9-2,5; Mg - 1,4-1,8; Si - 0,35; Fe - 0,8 -1,3; Ni - 0,8-1,3; Ti - 0,02-0,1.

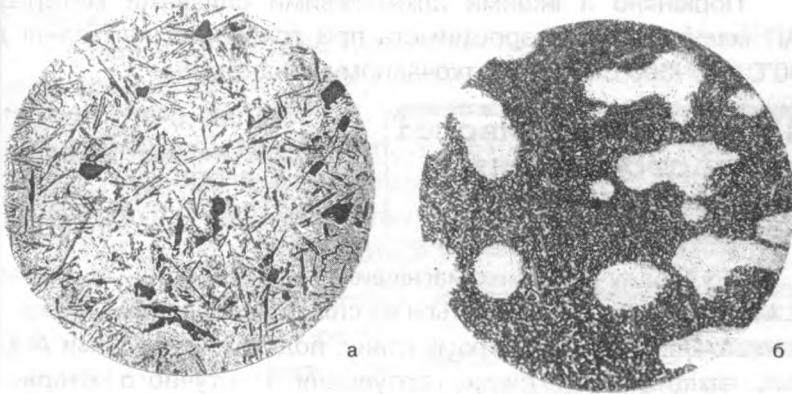


Рис. 5.16. Мікроструктура литого силуміну АЛ2 з 13 % Si: а - немодифікованого (α -твердий розчин та голчасті кристали кремнію - $\times 100$), б - модифікованого (дендрити α -твердого розчину - світлі - і евтектика $\alpha + \text{Si}$ - темні, $\times 300$)

Литі деталі виготовляють з жароміцних сплавів АЛ1, АЛ21. Сплав АЛ21 порівняно зі сплавом АЛ1 має кращі ливарні властивості. Складовими частинами сплаву (в %) є: 3,5-4,5 Cu; 0,7-1,2 Mg; 0,15-0,3 Mn; 0,15-0,25 Cr. Для досягнення максимальної жаростійкості виливки зі сплаву гартують при температурі 535-545°C і піддають старінню при 230°C протягом 10 годин чи відпалюють при 300°C.

Спечені сплави алюмінію. Широко використовують сплави на основі Al-Al₂O₃, що одержали назву САП (спечений алюмінієвий порошок або пудра). Такі сплави одержують у спосіб холодного брикетування алюмінієвого порошку, вакуумної дегазації брикетів і наступного спікання нагрітих брикетів під тиском.

САП складається з алюмінію і дисперсних лусочок Al₂O₃. Частинки Al₂O₃ ефективно гальмують рух дислокацій і підвищу-

ють міцність сплаву. Вміст Al_2O_3 в САП коливається від 6-9 % (САП 1) до 18-22 % (САП 4).

Порівняно з іншими алюмінієвими сплавами матеріали САП мають високу жаростійкість при тривалому нагріванні до 500°C і до 1000°C при короткочасному навантаженні.

33. Які властивості та застосування сплавів магнію?

Магній має невелику густину ($1,75 \text{ г/см}^3$), у нього відсутні алотропічні перетворення. Температура плавлення магнію - 650°C .

До складу основних магнієвих сплавів входять Al, Zn, Mn, Zr. Магнієві сплави поділяються на сплави, що деформуються, та ливарні. Вони мають діаграму стану, подібну до діаграми Al-Cu, тому зміцнюються після гартування і штучного старіння. Гартування литого сплаву проводиться при температурах $380-420^\circ\text{C}$, старіння - при $200-300^\circ\text{C}$. При старінні σ_s деформівних сплавів зростає на 10-30 %, литих - на 30-60 %.

Магнієві сплави, що деформуються. Магній погано деформується за нормальних температур. Пластичність сплавів підвищується за гарячої обробки тиском (при $360-520^\circ\text{C}$ залежно від марки сплаву). Магнієві сплави, що деформуються, маркують так: МА1, МА 2-1, МА 14.

Сплав МА1 (1,3-2,5 % Mn) характеризується високою технологічною пластичністю, доброю зварюваністю і корозійною стійкістю. За механічними властивостями він належить до сплавів низької міцності. Уведення до сплаву Mg-Mn 0,2 % цезія (МА8) подрібнює зерно, поліпшує механічні властивості й покращує деформацію у холодному стані.

Сплав МА2-1 належить до системи Mg-Al-Zn, має досить високі механічні властивості, добру технологічну пластичність і зварюваність, проте схильний до корозії під напруженням. Сплав МА2-1 піддається всім видам листового штампування та прокатування.

З магнієвих сплавів, що деформуються, виготовляють деталі автомашин, літаків, прядильних і ткацьких верстатів.

Ливарні магнієві сплави маркують буквами МЛ (МЛ6, МЛ-10, МЛ-12).

Сплави МЛ5 і МЛ6 належать до системи Mg-Al-Zn. Найпоширенішим з цієї групи є сплав МЛ5, складовими якого є (в %): Al - 7,5-9; Zn - 0,2-0,8; Mn - 0,15-0,5. Сплав має високі механічні й ливарні властивості. З ливарних сплавів виготовляють деталі двигунів, приладів, телевізорів, швейних машин.

Магнієвим сплавам притаманна висока питома міцність і тому вони широко застосовуються у літако- і ракетобудуванні.

Густина чистої міді становить $8,9 \text{ г/см}^3$; температура плавлення - 1083°C ; електропровідність - $(0,65 \text{ мком} \cdot \text{м})^{-1}$. Механічні властивості міді відносно низькі. Так, у литому стані $\sigma_{\text{в}} =$

34. Які властивості мають сплави на основі міді та де їх застосовують?

$150\text{-}200 \text{ МПа}$, $\delta = 15\text{-}25 \text{ \%}$. Тому як конструкційний матеріал мідь знаходить обмежене застосування. Маркують мідь залежно від наявності в ній домішок: М00 (99,97 % Cu); М0 (99,95 % Cu), М2, М3 і М4 (99 % Cu). Мідь широко застосовують в електротехніці та в інших галузях народного господарства. На її основі виготовляють найважливіші технічні сплави: латунь (сплав міді з цинком), бронзу (сплав міді з іншими, крім цинку, елементами).

Латунь. Розчинність цинку в міді при 20°C становить 39 %, а при 904°C вона знижується до 32 %. Зниження розчинності цинку починається після нагрівання її до 452°C .

Латунь може мати у своєму складі до 45 % Zn. Підвищення кількості цинку в латуні підвищує міцність ($\sigma_{\text{в}}$ до 450 МПа). Максимальна пластичність латуні спостерігається при вмісті цинку близько 37 %. На рис. 5.17 показано залежність $\sigma_{\text{в}}$ і δ від кількості цинку в латуні.

Сплави міді з іншими елементами. Сплав міді з алюмінієм (БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4) називають алюмінієвою бронзою, а сплави міді з кремнієм, оловом та іншими елементами (БрКМцЗІ, БрОЦС-5-5-5, БрСЗО тощо) - відповідно кремнистою, олов'яною, берилієвою та іншими бронзами (рис. 5.20).

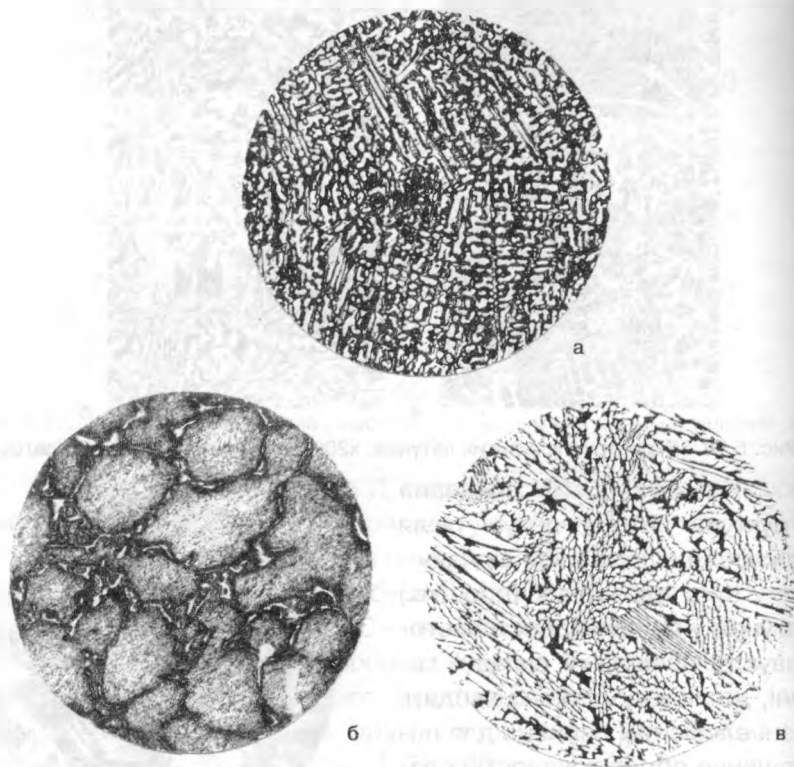


Рис. 5.20. Мікроструктура литої бронзи, $\times 200$: а - олов'янистої з 6 % Sn, б - олов'янистої з 10 % Sn, в - алюмінієвої

Алюмінієву бронзу піддають гартуванню у воді за мінімальної температури 900°C і відпуску при нагріванні до різних температур. З алюмінієвої бронзи виготовляють втулки, напрямні сидла, фланці, шестірні та інші дрібні відповідальні деталі. Кремнис-

Металеві матеріали машинобудування

та бронза є заміником олов'янистої. Наприклад, бронза БрКМцЗ-1 (3 % Si і 1 % Mn) є заміником олов'янистої бронзи БрОЦС6-6-3 (6 % Sn; 6 % Zn і 3 % Pb). Кремниста бронза краща за олов'янисту за протикорозійною стійкістю, механічними властивостями і щільністю виливок та зливків, але поступається їй величиною усадки.

Берилієва бронза БрБ2 (з 2 % Be) має високу хімічну стійкість, добре зварюється, легко ріжеться. З цієї бронзи виготовляють пружини, мембрани, пружні контакти, безіскрові інструменти для ведення вибухонебезпечних гірничих робіт тощо. Берилієву бронзу гартують у воді після нагрівання до 800°C і піддають штучному старінню при 325°C . Механічні властивості берилієвої бронзи після старіння: ($\sigma_{\text{в}}$ = 1100-1200 МПа; твердість 170 НВ; δ = 1 %).

Свинцевиста бронза БрС30 є високоякісним антифрикційним матеріалом, який широко застосовують у машинобудуванні.

Титан - це сріблясто-білий метал, що має високу протикорозійну стійкість, міцність 270 МПа, відносно видовження до 25 %, твердість 100-140 НВ. Густина титану становить $4,5\text{ г/см}^3$, температура плавлення - 1672°C .

34. Які властивості сплавів титану та де вони застосовуються?

Титан може бути двох алотропічних модифікацій: α -титан при температурі до $882,5^{\circ}\text{C}$ з гексагональною щільноупакованою ґраткою і β -титан при температурі понад 882°C з кубічною об'ємно-центрованою ґраткою.

Титан і його сплави не піддаються корозії в атмосфері, кислотах, питній і морській воді, а також стійкі проти газової корозії. У плавиковій і міцних сірчаній та азотній кислотах корозієстійкість титану невисока. При температурі нагрівання понад 250°C титан інтенсивно окислюється.

Технічний титан марок ВТ1 і ВТ2 виготовляють у вигляді напівфабрикатів (листи, прутки, стрічки, поковки).

Основними промисловими титановими сплавами (рис. 5.21) зі структурою $\alpha + \beta$: α -твердий розчин різних компонентів у α -титані та β -твердий розчин різних компонентів у β -титані є:

BT6 (5-6,5 % Al, 3,5-4,5 % V); BT8 (5,8-6,8 % Al, 2,8-3,8 % Mo)



Рис. 5.21. Мікроструктура сплаву BT6 після деформації і відпалу, $\times 250$

Сплави на основі титану, так само як і сталь, схильні до значного переохолодження високотемпературної модифікації твердого розчину β , що зумовлює виникнення різноманітних структур при термічній обробці.

Титанові сплави перевищують інші метали за міцністю (під значення дістають діленням σ на густину γ). При підвищенні температури нагрівання до 400-450° С питома міцність сплавів

титану (питома жароміцність) залишається вищою, ніж у неіржавіючих і жаростійких сталей.

Антифрикційні властивості титанових сплавів невисокі. Щоб підвищити зносостійкість, титанові сплави піддають цементуванню й азотуванню.

Оскільки титан має високу міцність при малій питомій вазі, його широко застосовують в авіації та ракетобудуванні (корпуси двигунів, балони для газів, сопла, диски, лопатки компресора, деталі кріплення, фюзеляжу); хімічній промисловості (компресори, клапани, вентиля для агресивних рідин); морському і річковому суднобудуванні (гребні гвинти, обшивка морських суден, підводних човнів); криогенній техніці.

Крім чавуну і бронзи, для виготовлення вкладишів підшипників застосовують сплави на основі свинцю, олова, цинку або алюмінію. Такі сплави називаються бабітами.

36. Які властивості підшипникових сплавів та де їх застосовують?

Чавунні вкладиші застосовують у тихохідних двигунах, бронзові - у відповідальних підшипниках, що працюють у складних умовах (високі тиски, велика кількість обертів тощо).

Бабіти є м'якими легкоплавкими матеріалами з незначним коефіцієнтом тертя, добре утримують мастило на поверхні вкладиша. Олов'яні та свинцеві бабіти виготовляють на основі сплавів системи Pb-Sb, Sn-Sb, Sn-Pb-Sb; цинкові - на основі цинку; алюмінієві - на основі алюмінію. Бабіти застосовують при незначних питомих тисках.

Твердість свинцю становить близько 3 НВ, сурми - близько 30 НВ. Евтектика, що складається з 13 % Sb і 87 % Pb, має твердість близько 7-8 НВ. Твердість олова - близько 5 НВ. Сплав з 13 % Sb і 87 % Sn є композицією, де α -твердий розчин на основі олова забезпечує високі антифрикційні якості вкладишів.

Усі бабіти, мікроструктура яких наведена на рис. 5.22, поділяються на три групи. Найкращими є олов'янисто-сурм'яні бабіти (Б83 і Б89). Хімічний склад бабіту Б83 такий: основа - Sn; 10-12 % Sb; 5,5-6,5 % Cu; 0,55 % - сума домішок. Наступним за якісними показниками є бабіт Б16. М'якою основою цього бабіту є свинець. Свинцево-сурм'яний бабіт БС та свинцево-кальцієвий БК за якістю поступаються вищезазваним бабітам.

Бабіти БК і БС широко застосовуються на залізничному транспорті. Через дефіцит олова й свинцю використовують в основному сплави на основі цинку й алюмінію: ЦАМ 10-5 (10 % Al, 5 % Cu, решта - Zn), АСС6-5 (5-6 % Sb, 4-5 % Pb, 0,5-0,7 % Mg, решта - Al).

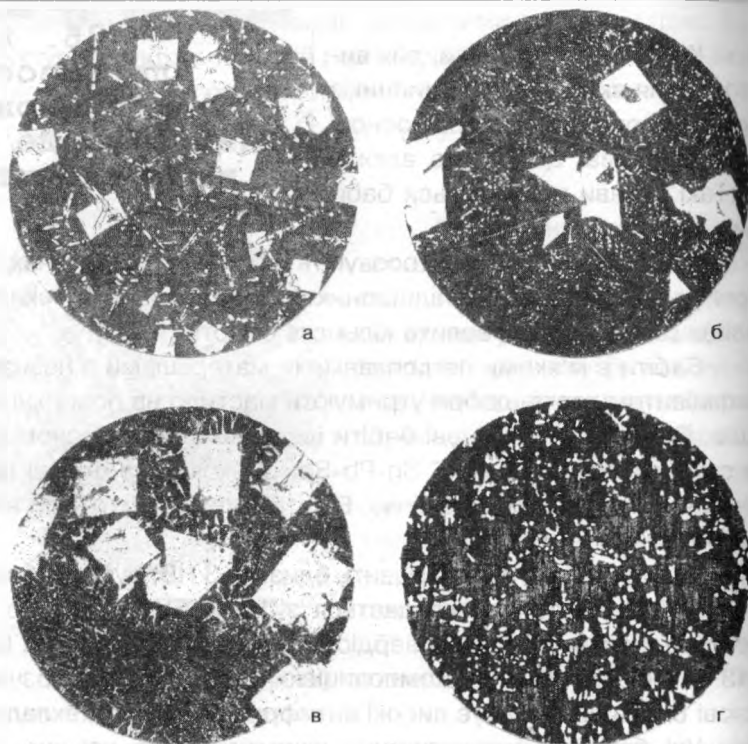


Рис. 5.22. Мікроструктура бабітів, $\times 100$: а - Б83, б - Б16, в - БС, г - БК

Сплави на основі цинку за своїми властивостями поступаються бабітам на олов'яній основі. Алюмінієві бабіти за своїми технологічними властивостями поступаються звичайним бабітам. Вони мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Оскільки алюмінієві бабіти мають високу твердість, то й шийка вала також має бути досить твердою, інакше відбуватиметься процес прискореного зношування. Це і є основним недоліком алюмінієвих бабітів. Алюмінієві бабіти використовують замість олов'яних і свинцевих, а також замість свинцевистої бронзи.

Припої застосовують для з'єднання різних металевих елементів у вузли, для герметизації ємкостей, при монтажних роботах з електричними та іншими схемами в різних апаратах і приладах. М'які припої мають низьку температуру плавлення, низькі механічні властивості й використовуються тільки для створення герметичних з'єднань.

37. Які властивості сплавів для припоїв?

При паянні та лудінні широко застосовуються такі припої:

ПОС-90, ПОС-61, ПОС-30, що містять відповідно 90, 61, 30 % олова, незначну кількість (близько 1 %) сурми, решта - свинець. Найбільш легкоплавким припоєм є ПОС-61, який називають *третником*. Тверді припої розплавляються при температурах 745-850°C. Значну групу складають тверді срібні припої: ПСр72 (72 % Ag; 28 % Cu); ПСр50 (50 % Ag, 50 % Cu); ПСр25 (25 % Ag, 75 % Cu).

Крім наведених, застосовують також олов'яно-цинкові припої, які складаються з 90, 70, 60 і 40 % Sn, а решта - Zn. Марки цих припоїв: ПОЦ-90, ПОЦ-70, ПОЦ-60 і ПОЦ-40. Температура початку кристалізації ПОЦ-70 становить 325°C, ПОЦ-60 - 345°C, а ПОЦ-40 - 365°C. Кристалізація всіх припоїв закінчується при температурі 199°C. Олов'яно-цинкові припої міцніші, ніж олов'яно-свинцеві, але вони мають меншу пластичність.

Легкоплавкими вважають сплави, температура плавлення яких нижче за 230°C. Щоб вилучити легкоплавкі сплави з металів, що мають низьку температуру плавлення, їх об'єднують у такі сполуки, які забезпечують утворення багатокомпонентної евтектики.

38. Що таке легкоплавкі сплави?

З легкоплавких сплавів виготовляють різні запобіжники і вставки, матеріали для зліпків тощо.

Легкоплавкі матеріали маркуються буквою Л і цифрою, що означає температуру плавлення цього сплаву. Марки і склад де-

яких легкоплавких сплавів: Л199 (91,1 % Sn, 8,9 % Zn), Л146 (49,8 % Zn, 32,0 % Pb, 18,2 % Cd), Л47 (8,3 % Sn, 22,6 % Pb, 5,3 % Cd, 44,7 % Bi).

Чиста ртуть і сплави системи Fe-Hg плавляться при температурі нижчій за 0°C. Найбільш легкоплавкий металевий сплав містить 8,5 % Te, 91,5 % Hg і плавиться при температурі - 59°C.

39. Які особливості сплавів цинку, благородних металів та їхнє застосування?

Густина цинку становить 7,14 г/см³, температура плавлення 419°C, кристалічна ґратка гексагональна, має високу пластичність ($\delta = 50\%$). Алотропічних перетворень цей метал не має.

Найміцнішими з цинкових сплавів є сплави з алюмінієм і міддю. Цинкові сплави застосовують для виготовлення виробів методом прокатування і пресування, а також для друкарських шрифтів. Цинкові сплави маркують так само, як і бабіти. Наприклад, ЦАМ4-1 означає, що цей цинковий сплав містить близько 4 % алюмінію і близько 1 % міді.

До благородних металів належать золото, срібло, метали платинової групи та їхні сплави. Ці метали зовсім не піддаються корозії у звичайній атмосфері, воді та інших середовищах.

Всі ці метали, крім золота й срібла, мають високу температуру плавлення, високу густину, дуже пластичні (крім родію й осмію), у них відсутні алотропічні перетворення (крім родію). Оскільки благородні метали досить дорого коштують, використовують їх лише для виготовлення особливо важливих деталей апаратури.

40. Які основні властивості й застосування матеріалів, що виготовляють методами порошкової металургії?

Характерною особливістю порошкової металургії, як промислового методу виробництва різних деталей, є використання вихідної сировини у вигляді порошків, з яких пресуванням формуються вироби заданої форми і розмірів. Одержані заготовки піддаються спіканню

Металеві матеріали машинобудування

при температурі нижче температури плавлення основного компоненту шихти.

Розглянемо основні *переваги* технології виробництва виробів методом *порошкової металургії*.

1. Можливість виготовляти деталі з більшості тугоплавких металів і сполук, псевдосплавів, пористих матеріалів, виготовлення яких можливе лише цим методом.

2. Значна економія металу.

3. Вироби, одержані методом порошкової металургії, мають високу точність потребують незначної механічної обробки.

4. Відходи за такого способу виробництва не перебільшують 1-5 %.

5. Можливість одержати матеріали високої чистоти.

6. Простота технології.

Методом порошкової металургії виготовляють тверді сплави, антифрикційні й фрикційні матеріали, фільтри, електропровідники, конструкційні деталі, зокрема такі, що працюють при високих температурах і в агресивних середовищах.

Антифрикційні матеріали. Підшипники з порошкових матеріалів виготовляють пресуванням і спіканням з бронзового або залізного порошку з добавкою графіту (1-3 %). Металокерамічні антифрикційні матеріали з порошків відрізняються тим, що в них є пори (15-30 % загального об'єму виробу). Застосування залізографітових підшипників дає можливість заощадити значну кількість сплавів кольорових металів - бронз, бабітів. Наявність графіту і запас рідкого мастила в порах металокерамічних підшипників дозволяє їм самозмащувати себе. Ця властивість зменшує небезпеку виходу з ладу вузлів тертя через нестачу мастила. Використання порошкових матеріалів замість литих підвищує термін експлуатації підшипників в 1,5-10 разів. Коефіцієнт тертя металокерамічних підшипників 0,04-0,06. Вони можуть працювати при швидкостях тертя 6 м/с при навантаженнях до 600 МПа, при менших навантаженнях швидкості ковзання можуть досягати 20-30 м/с.

Останнім часом швидко поширюється застосування металопластмасових підшипників. Завдяки високим антифрикційним властивостям у роботі без мастила перспективними вважаються підшипники, насичені фторопластом. Коефіцієнт сухого тертя підшипників, насичених фторопластом, $f = 0,05$. Вони можуть працювати в кислих і лужних середовищах при температурах до 280°C .

Розроблені антифрикційні матеріали, що експлуатуються при високих температурах (підшипники газових і парових турбін), ущільнювальні матеріали турбін. Як вихідні для цих деталей використовуються порошки хромонікелевих сталей типу X18H15, ХЗН18 тощо з домішками в шихту дисульфиду молібдену.

Фрикційні матеріали. Надійність роботи багатьох машин та механізмів при зростанні швидкості й навантажень на робочі частини залежить від якості роботи гальмівних пристроїв. У зв'язку з цим створення високоякісних фрикційних матеріалів набуває особливої ваги. Сьогодні для обладнання гальмівних пристроїв автомобілів, пресів, вантажопідйомних машин та механізмів застосовують фрикційні матеріали на основі пластмас з різними домішками. До таких матеріалів належать ферродо, гетінакс, текстоліт з коефіцієнтом тертя відповідно 0,25-0,45; 0,25-0,30; 0,30-0,35. Проте ці матеріали у складних умовах експлуатації недосить зносостійкі. Застосовуючи методи порошкової металургії, можливо створити матеріали, які повніше відповідають вимогам щодо фрикційних матеріалів. Ці матеріали можуть працювати при швидкостях тертя до 50 м/с і навантаженнях 350-400 МПа, а інші матеріали - при навантаженнях лише до 50-60 МПа.

Фрикційні матеріали з порошків мають коефіцієнт тертя при роботі в маслі $f = 0,08-0,15$, при сухому терті по чавуну - до 0,3-0,5 і навіть до 0,7.

Розглянемо складові типового фрикційного матеріалу на мідній основі, що призначений для роботи в маслі (в %): мідь - 60-70, олово - 5-7, свинець - 5-15, цинк - 5-10, залізо - 5-10, кремнезем або карбід кремнію - 2,5-3, графіт - 1-2. Розроблені також матеріали на основі заліза для роботи при терті без

Металеві матеріали машинобудування

мастила. Приблизний склад таких матеріалів (%): залізо - 64, мідь - 15, графіт - 9, асбест - 3, барій сірчаноокислий - 6, кремнезем - 3. Такі матеріали допускають температуру на поверхні тертя вище 1000°C. Змінюючи вміст окремих компонентів, можна значною мірою регулювати фрикційні та інші властивості матеріалів.

Фільтри. Високоякісна робота багатьох машин досягається підвищенням чистоти пального і мастил. Для підвищення чистоти навколишнього середовища, продуктів виробництва і поліпшення якості матеріалів у сучасній техніці дедалі ширше застосовують такий метод очистки, як фільтрація. Методи порошкової металургії сприяли розробці фільтрів, які, порівняно з тканинними, войлочними, картонними та іншими, мають низку переваг. Вони міцніші, працюють при підвищених температурах, добре витримують різке нагрівання, не забруднюють матеріалом фільтра середовище, що фільтрується, мають добру проникливість, затримують частинки розміром від 0,5 мкм. Фільтри з порошкових матеріалів широко використовують у промисловості для фільтрації палива і мастил, різних масел і смол, очистки газів і повітря від пилу, фільтрації розплавлених низькоплавких металів, кислот, лугів та інших продуктів хімічної промисловості.

Розроблені фільтри працюють при температурі до 300°C при тиску до 190 Па з продуктивністю до 300 л/хв. і очищають від забруднень з розміром частинок 2 мкм і більше.

У виготовленні фільтрів застосовують порошки бронзи, нікелю, неіржавіючих сталей, заліза та інших матеріалів. Проникливість і фільтруюча здатність фільтрів залежать від величини частинок вихідного порошку та пористості. Чим тонший вихідний порошок, тим менший розмір пор, тим якісніше очищає фільтр. Чимала перевага таких фільтрів - їх можливість регенерації після забруднення.

Конструкційні матеріали. У низці випадків методом пресування порошків можна зі значним економічним ефектом виготовляти деталі машин, які за звичайних методів виготовлення потребують трудомісткої механічної обробки. Метод формування

деталей за майже остаточними розмірами дозволяє заощадити метал і скоротити витрати на обробку, що знижує вартість виробів на 40-50 % і більше.

Основним матеріалом для цього типу деталей є залізний порошок, з якого можна пресувати шестірні, плоскі важелі, сепаратори кулькових і роликів підшипників, деталі різних приладів і машин, інші вироби.

Широко застосовуються металокерамічні електротехнічні матеріали (сильнострумні контакти - W-Cu-композиції; слабо-струмні контакти - ферити, постійні магніти тощо).

Керамічні матеріали. Ці матеріали одержують формуванням мінеральних мас з їх наступним випалюванням. До матеріалів з твердих і тугоплавких сполук належать бориди, карбіди, силіциди, нітриди, оксиди. Ці матеріали мають високу твердість, що наближається до твердості алмазу, і тугоплавкість (переважна частина цих сполук плавиться при температурах понад 2500°C, а деякі - понад 4000°C). Вони мають високу стійкість проти окислення за нагріву на повітрі та проти дії агресивних хімічних середовищ. Ці особливості уможливають широке використання тугоплавких сполук у різних галузях сучасної техніки, особливо в металургії; в хімічній промисловості їх застосовують як вогнетривкі матеріали, в радіоелектроніці - як ефективні термоджерела (джерела електронів) генераторних пристроїв, у газотурбобудуванні - як складові жаростійких сплавів, у машинобудуванні - як алмазозамінники у шліфувальних роботах і багатьох інших галузях техніки.

41. Які вимоги і основні властивості композиційних матеріалів?

Композиційними матеріалами (КМ) в техніці називають штучно створені матеріали з двох і більше компонентів, що відрізняються складовими, і поділені чіткою границею, котрі неоднорідні у мікромаштабі та мають нові властивості, запроектовані раніше. Міцність КМ можна визначити із залежності:

$$\sigma_k = \sigma_v V_v + \sigma_m V_m,$$

де: σ_k - міцність КМ (руйнуюче напруження);
 V - об'ємна доля фаз у композиті;
 індекси «к», «в», «м» - належать відповідно до КМ (к), волокна (в), матриці (м).

Компонент, неперервний по всьому об'єму КМ, називається *матрицею*. Компонент переривистий, роз'єднаний в об'ємі композиції, називається *арматурою*. Матриця може бути металевою, полімерною або змішаною. Вона надає необхідну форму виробам, впливає на створення властивостей КМ, захищає арматуру КМ від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища. Арматура КМ підвищує міцність матриці. Вона може бути у вигляді кристалів, волокон, тканини з волокон, порошку з різних матеріалів.

Композиційні матеріали мають високий опір крихкому руйнуванню. З багатьох причин КМ, зокрема, перспективні як високожароміцні матеріали. Для збільшення коефіцієнту корисної дії теплових машин (газових турбін) найважливіша деталь турбін - лопатка - працює в найбільш важких умовах. Армування нікелевих сплавів нитками сапфіру (Al_2O_3) дозволяє суттєво підвищити температуру на вході в турбіну (значення σ_s сапфірних кристалів при $1650^\circ C$ вище 700 МПа). Вивчаються можливості використання для виробництва турбінних лопаток методу спрямованої кристалізації евтектик таких систем, як Al- Al_2Ni ; Cu-Cr; Al-Cu Al_2 , зокрема методом безперервного лиття.

Армування сопел ракет з порошків вольфраму і молібдену здійснюють кристалами Al_2O_3 як у вигляді войлоку, так і окремих волокон, завдяки чому вдалося подвоїти міцність матеріалу при $1650^\circ C$. Композиційні матеріали є ідеальним матеріалом для партертя в умовах космосу, де неможливе застосування звичайного мастила.

У виробництві кристалів для армування КМ використовують металевий дріт з різних металів - сталі різного хімічного

складу, вольфраму, титану, ніобію залежно від умов роботи КМ. Для армування легких металів завдяки їхній високій міцності і малій щільності застосовують волокна бору, карбіду кремнію. Особливо цінними властивостями характеризуються вуглецеві волокна (ВВ), які мають $\sigma = 2,5-3,5$ ГПа при $\gamma = (1,6-1,8) \times 10^3$ кг/м³. Як матриці КМ можуть застосовуватися легкі (магній, алюміній, титан), кольорові, тугоплавкі метали та полімерні матеріали. Дисперсно-зміцнені композиційні матеріали (ДКМ) належать до класу порошкових КМ. Структура ДКМ складається з матриці (чистого металу або сплаву), де рівномірно розподілені тонкодисперсні частинки зміцнювальної фази розміром менше 0,1 мкм. Зміцнення створюється гальмуванням рухові дислокацій в матриці цими частинками.

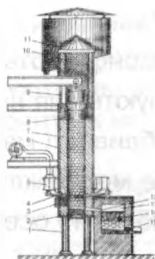
Отримують вироби з металевих КМ у спосіб деформування, виливання. Досить широко виробляють КМ методами порошкової металургії, якщо матриця і арматура у вихідному стані перебувають у вигляді порошку.

РОЗДІЛ 6

Металургія і ливарне виробництво

6

**доменна піч
вагранка
конвертор
розливка сталі
мартен
виливок
модельний комплект
ливникова система
опока
кристалізатор**



Питання, висвітлені у розділі 6

1. Що таке металургія? Які основні способи одержання металів?
2. Які матеріали та процеси застосовуються в металургійному виробництві?
3. Як одержують чавун з руди? Як працює доменна піч?
4. Як виготовляють чавун у ливарному виробництві? Що таке вагранка?
5. Як виплавляють сталь? Які особливості та різновиди технологій виробництва сталі?
6. Як здійснюють розливку сталі та чавуну?
7. Яка сутність ливарного виробництва? Які існують основні способи виготовлення виливків?
8. Які особливості переходу металів з рідкого стану в твердий?
9. Які існують ливарні властивості сплавів?
10. Що таке модельний комплект?
11. Які існують різновиди ливарних форм?
12. Що таке ливникова система?
13. Що таке надлив?
14. Які властивості повинні мати формівні й стрижневі матеріали?
15. Як класифікують формівні суміші та які матеріали використовують для них?
16. Які особливості має структура литого металу?
17. Що таке модифікатор і модифікування металів?
18. Які різновиди і особливості технологій спеціальних способів лиття?
19. За якими ознаками оцінюють якість виливків і контролюють наявність ливарних дефектів?

Металургія - це одержання металів і металевих сплавів з руд або з інших вихідних матеріалів. Продукцією чорної металургії є чавуни (передільні, ливарні), феросплави (сплави заліза з підвищенням вмістом одного з металів - Mn, Si, Cr, Ni тощо), а також сталь у вигляді зливків для виробництва сортового прокату і поковок. Сталь виплавляють з чавуну, а спочатку чавун одержують з руди.

1. Що таке металургія? Які основні способи одержання металів?

Кольорові метали та їх сплави, а також зливки для виробництва прокату є продукцією кольорової металургії. Технологічні процеси кольорової металургії досить різноманітні й залежать від особливостей хімічного складу руди.

Розглянемо чотири основні способи одержання металів.

Пірометалургійний - один з найстаріших і сьогодні основних способів одержання заліза, його сплавів, міді та інших металів. Необхідне для процесу тепло забезпечується спалюванням органічного палива.

Електрометалургійний - заснований на використанні електричних печей (дугових, індукційних тощо) або процесу електролізу з розплавів (наприклад, одержання алюмінію з його триоксиду Al_2O_3) і розчинів хімічних сполук (наприклад, міді з розчину сірчаної міді (мідного купоросу $CuSO_4$)).

Гідрометалургійний - зводиться до вилучення металів з руд з використанням різних розчинників (лугів) і наступного виділення їх з розчину. Цей спосіб застосовують для одержання, наприклад, міді або урану. Процес здійснюють як на поверхні землі, так і під землею (в свердловинах).

Хіміко-металургійний - об'єднує хімічні й пірометалургійні процеси. Наприклад, виробництво титану відбувається за схемою: титанова руда-одержання чотирехлористого титану ($TiCl_4$) - відновлення титану магнієм.

Крім цих способів, для одержання металів і сплавів використовують технології порошкової металургії, електропроменевої та плазмової плавки тощо.

2. Які матеріали та процеси застосовуються в металургійному виробництві?

Для виробництва металів потрібні руда, паливо, флюси і вогнетривкі матеріали.

Рудою називають горні породи з вмістом металів у кількості, що забезпечує доцільність

її промислової переробки. Руда складається з мінералів, складовою яких є метал у вигляді оксидів, сульфідів, карбонатів і пустої породи (здебільшого у вигляді SiO_2 , Al_2O_3) з домішками S, P, As тощо. У найпоширеніших залізних рудах вміст заліза може коливатись від 30 до 60 %. Так, червоний залізняк (гематит) безводний Fe_2O_3 містить 50-60 % заліза; магнітний залізняк Fe_3O_4 - 55-60 %; бурий залізняк $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ - 30-50 % заліза; шпатовий залізняк FeCO_3 - 30-40 % заліза.

У рудах кольорових металів вміст металу невеликий і становить у кращому випадку 2-5 %, а в більшості - лише долі процента (наприклад, до 0,02 %).

Перед плавленням залізні руди піддають спеціальній обробці з метою підвищення в них вмісту заліза, зменшення кількості сірки і фосфору, надання руді однорідності й певного грануляційного складу.

Збагачення, або збільшення вмісту заліза в руді, здійснюють промивкою руди водою, або методом гравітації при проходженні води через вібруюче решето з рудою. Це дає змогу відокремити легшу пусту породу. Магнетитові руди збагачують, використовуючи різні магнітні властивості залізомістких матеріалів і породи (магнітна сепарація). Збагачену руду (концентрат) піддають подальшій агломерації або окатуванню.

Агломерація - це спікання в спеціальних агломераційних машинах при 1300-1500°C суміші руди (40-50 %), вапняку (15-20 %), дрібного агломерату і коксу. Під час цього процесу видаляється частина домішок, розпадаються карбонати і утворюється офлюсований пористий матеріал - агломерат.

Окатування - це процес виготовлення окатишів - кулястих гранул діаметром 25-30 мм зі зволоженої суміші тонко подрібнених рудних концентратів і флюсу, просушування і обпалювання їх при температурі 1200-1500 С. Застосування агломерату і окатишів поліпшує процес плавки, підвищує продуктивність доменної печі на 10-25 %, зменшує витрати коксу на 10-20 %.

Проте очищення руди до плавки методами збагачення є недостатнім. Тому в металургійних процесах використовують спеціальні матеріали - флюси, які утворюють з пустою породою, золою палива та іншими неметалічними домішками легкоплавку сполуку - шлак. Порівняно з металом шлак більш легкий, що дозволяє відокремити і видалити його у процесі плавки. При плавленні чорних і деяких кольорових металів флюсами служать кварцовий пісок, що складається з SiO_2 , вапняк CaCO_3 та інші сполуки кальцію і магнію.

Основними видами палива у металургійному виробництві є такі.

Кокс - продукт сухої перегонки кам'яного вугілля при 1000-1100 °С без доступу повітря. Побічні продукти цього процесу: бензол, феноли, коксовий газ; природний газ - складається здебільшого з метану CH_4 ; мазут - важкий залишок перегонки нафти, містить до 88 % вуглецю, 10-12 % водню і невелику кількість кисню і сірки; доменний газ - побічний продукт виплавки чавуну в доменній печі. Він містить значну кількість плавильних складових - до 32 % CO , до 4 % H_2 .

Вогнетривкі матеріали використовують для виготовлення футеровки (внутрішнього облицювання) плавильних печей та іншого обладнання, що експлуатується за умов високих температур і контакту з розплавленим металом та шлаком. За хімічним складом вогнетриви поділяються на кислі, основні й нейтральні. До кислих відносять динасову цеглу, кварцовий порошок та інші матеріали з високим вмістом SiO_2 . Основні, вогнетриви - це доломітові, магнезитові та інші матеріали з високим вмістом оксидів MgO , CaO . До нейтральних відносять матеріали, що складаються з оксидів MgO , Al_2O_3 , Cr_2O_3 та інших (шамот, хромомagneзит), а також вуглецева цегла.

3. Як одержують чавун з руди? Як працює доменна піч?

0,3 %) і сірка (до 0,07 %). Чавун також служить основним вихідним матеріалом для виготовлення сталі. Його одержують пірометалургійним способом у доменних печах.

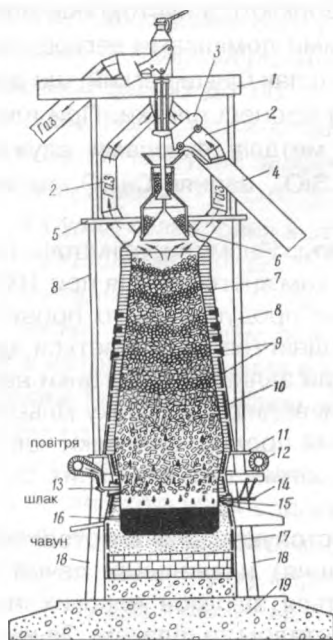


Рис. 6.1. Розріз доменної печі: 1 - копер; 2 - газівідвід; 3 - скіп; 4 - похилий міст; 5 - колошниковий майданчик; 6 - засипний апарат; 7 - шамотна футеровка; 8 - колона; 9 - холодильники; 10 - броня; 11 - маратор; 12 - кільцевий повітропровід; 13 - фурма; 14 - шлаковий стопор; 15 - шлакова летка; 16 - чавунна летка; 17 - кладка вуглецева; 18 - основна колона; 19 - фундамент

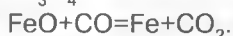
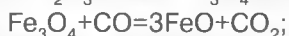
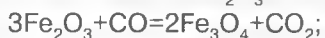
Чавун - найпоширеніший залізовуглецевий ливарний сплав із вмістом вуглецю понад 2,5 %. У ньому можуть бути присутні кремній (до 2%), марганець (до 2 %), фосфор (до

Сучасна домна - це шахтна піч безперервної дії, виготовлена з вогнетривкої цегли і покрита кожухом з листової сталі завтовшки до 35 мм. Ця складна інженерна споруда має висоту 35-100 м, корисний об'єм до 5000 м³ і продуктивність до 6000 т за добу. Доменна піч (рис. 6.1) складається з п'яти основних частин: колошника, шахти, розпару, заплечиків і горна. Для виплавлення чавуну до колошника подають шихту - суміш руди, палива (коксу) і флюсів у певному співвідношенні. Такі окремі порції шихти називають колошами. Колоші надходять до шахти, де руда підсушується і відновлюється залізо. У розпарі починається розплавлення металу і утворення шлаку. У заплечиках утворюються чавун і шлак. Найважливіша частина

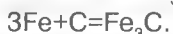
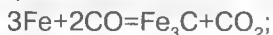
домни - горно. Знизу його обмежує лещадь (под горна). Горно має фурми - пристрої для вдуння в піч гарячого, нагрітого до 1200-1300°C повітря. У нижній частині горна розташовані льотки для випуску шлаку і для випуску чавуну. Великі домни мають 3-4 льотки для випуску чавуну, що забезпечує безперервність металургійного процесу.

Доменна піч працює за принципом протитоку: шихтові матеріали рухаються зверху вниз, а назустріч їм надходить потік гарячих газів - продуктів згорання палива.

Одержання чавуну - це складний хімічний процес. Він складається з трьох основних стадій: відновлення заліза з оксидів, перетворення заліза на чавун, утворення шлаку. Відновлення заліза з руди здійснюється за схемою $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$



Частина закису заліза, що надійшла до розпару і заплечиків, відновлюється вуглецем коксу, вуглецем сажі та воднем. Внаслідок цього утворюється губчасте залізо, яке насичується вуглецем при 1000-1100 °C:



Вуглець знижує температуру плавлення залізовуглецевого сплаву, який у нижній частині шахти починає плавитися, додатково насичується вуглецем та іншими елементами, відновленими з руди, - Mn, Si, P, S. Таким чином у горні печі утворюється чавун-основний продукт доменного процесу. Одночасно з чавуном у нижній частині печі накопичується шлак-сплав пустої породи, флюсів, золи палива, частини невідновлених оксидів. Періодично чавун (через 3-4 год.) і шлак (через 1-1,5 години.) випускають з печі.

Основні продукти доменного виробництва - чавун, шлак і колошниковий газ.

Залежно від складу і призначення чавуни поділяють на такі види

- *переробний* - основний вид чавуну, що перероблюють на сталь ($C = 4-4,5 \%$; $Si = 0,6-0,8 \%$; $Mn = 0,25-1 \%$; S - до $0,07 \%$;

- *ливарний чавун* - характеризується підвищеним вмістом кремнію ($2,57-3,25 \%$), призначений для переплавки і виготовлення фасонних виливків;

- *феросплави* - сплави заліза з підвищеним вмістом інших елементів: феросиліцій (Si - $9-13 \%$), феромарганець (Mn - $70-75 \%$) тощо, призначені для розкислення і легування сталі.

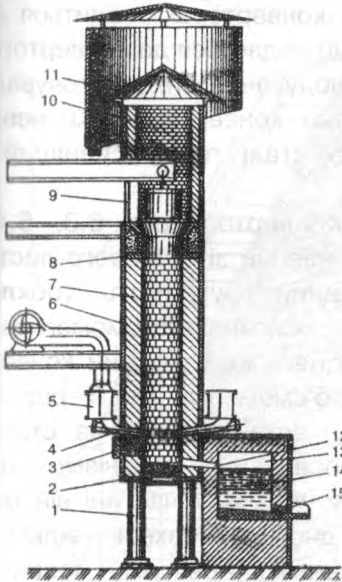
Колошникові гази (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , N_2 тощо) піднімаються з печі та у зоні колошника відводяться по трубах. Їх використовують як паливо для нагрівачів повітря домни.

Шлак використовують у виробництві будівельних матеріалів - цементу, шлакоблоків, шлаковати.

4. Як виготовляють чавун у ливарному виробництві? Що таке вагранка?

У ливарному виробництві для виготовлення чавуну використовують шахтну піч безперервної дії - *вагранку* (рис. 6.2). Піч розташована

на опорній плиті (2), закріпленій на чотирьох колонах (1). Зсередини вагранку футерують шамотною цеглою (7), зверху покривають сталевим кожухом (6). Нижню частину (под) вагранки набивають стрижневою сумішшю через вікно (3), яке потім замурують. Через вікно (9) вагранку завантажують коксом, далі пошарово шихтовими матеріалами - чавуном, бруктом, коксом, флюсами. Зверху піч закінчується трубою (10) з іскрогасником (11). Паливом служить кокс і природний газ. Необхідне для горіння повітря подають з кільцевого повітропроводу (5) через фурми (4). Гази, що утворюються під час горіння палива, піднімаються вгору і нагрівають шихту. Після розплавлення шихти утворюється рідкий чавун і шлак. Вони стікають вниз по розжареному коксу, нагріваються і через отвір (12) надходять до накопичувача (13). Чавун і шлак періодично випускають через льотки для чавуну (15) і шлаку (14).



Продуктивність роботи вагранок-0,8-30 т/год.

Нині для плавки чавуну в ливарному виробництві застосовують електричні печі як досконаліший плавильний агрегат. Це дає змогу одержувати чавун з високою температурою розливки і низьким вмістом небажаної сірки.

Рис. 6.2. Будова вагранки. 1 - колони, 2 - опорна плита, 3 - вікно, 4 - фурми, 5 - кільцевий повітропровід, 6 - сталевий кожух, 7 - футеровка, 8 - чавунні плити, 9 - вікно завантаження шихти, 10 - труба, 11 - іскрогасник, 12 - отвір для стоку чавуну і шлаку, 13 - накопичувач, 14 - лійка випуску шлаку, 15 - лійка для випуску чавуну

Сталь - найважливіший матеріал машинобудування та інших галузей промисловості. Від чавуну вона відрізняється меншим вмістом вуглецю та домішок сірки і фосфору (0,06-0,07 %). До складу вуглецевих сталей у невеликих кількостях входять також марганець (до 0,8 %) і кремній (до 0,4 %). Леговані сталі для поліпшення властивостей вміщують додатково введені елементи (Ni, Cr, Ti, V та ін.). Вихідними матеріалами для виготовлення сталі є переробний чавун і сталевий брухт (скрап). Для одержання сталі з чавуну потрібно видалити частину вуглецю і шкідливих домішок, перевести їх у шлак або гази. Основними способами виробництва сталі є такі: киснево-конверторний, мартенівський і електричний.

5. Як виплавляють сталь? Які особливості та різновиди технологій виробництва сталі?

Виробництво сталі в кисневих конверторах зводиться до продування рідкого чавуну киснем, що подається до конверторної фурми зверху через фурму. Раніше для продування використовували повітря (бесмерівські й томасовські конвертори). Кисневий конверторний спосіб виробництва сталі прогресивніший і продуктивніший.

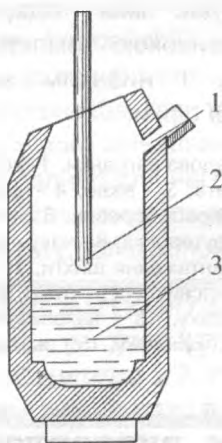


Рис. 6.3. Схема кисневого конвертера: 1 - отвір для зливання металу; 2 - водоохолоджувана фурма для подачі кисню; 3 - ванна рідкого металу

Конвертор (рис. 6.3, 6.4), виготовлений зі сталевих листів, зсередини футерують (обкладають) основною хромомagneзитовою цеглою. Сучасний конвертер (об'ємом 100-350 т рідкого чавуну) встановлюють на станинах і оснащують механізмом повороту. У нижній частині він має глухе дно, а у верхній - відкриту горловину, через яку завантажують шихту. Робоче положення конвертера - вертикальне, а під час завантаження і випуску сталі - горизонтальне. Перед початком роботи конвертор завантажують бруттом (до 30 %) і заливають рідким чавуном (1250-1400°C), да-

лі повертають конвертор у вихідне вертикальне положення, вводять кисневу фурму і додають шлакоутворюючі матеріали (флюси). Кисень подають під тиском 1-1,5 МПа через водоохолоджувану фурму (2), розташовану на відстані 0,7-3 м від рівня рідкого металу. Витрати кисню на виготовлення 1 т сталі становлять 50-60 м³. На початку процесу окислюються кремній, марганець і фосфор. Вони переходять у шлак, який зливають. Далі додають вапно для видалення у шлак сірки. Процес відбувається з інтенсивним виділенням тепла і не потребує палива. Температура підіймається до 2500°C. Вуглець вигорає.

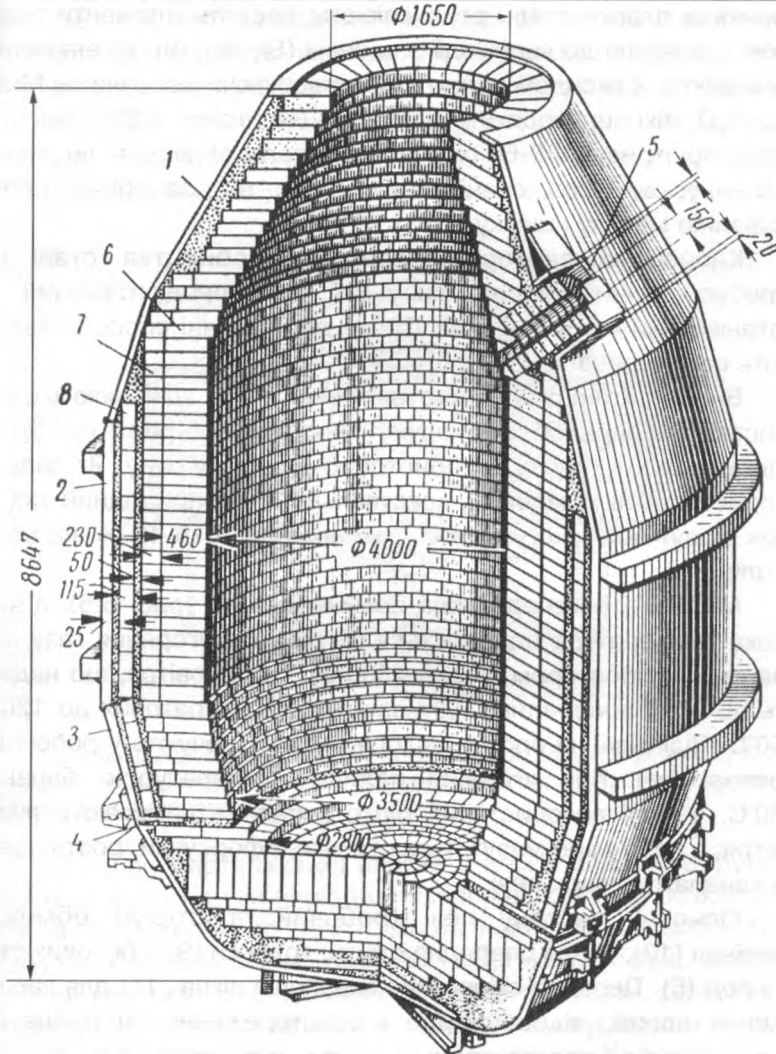


Рис. 6.4. Корпус кисневого конвертера з футеровкою: 1 - шльомна частина; 2 - циліндричний пояс; 3 - нижній зрізаний конус; 4 - кільце; 5 - сталевипускний отвір; 6 - робочий шар футеровки; 7 - проміжний шар футеровки; 8 - арматурний шар

Наприкінці плавки сталь розкислюють: вводять елементи з високою здатністю до взаємодії з киснем (Si, Mn, Al). Ці елементи взаємодіють з оксидом заліза FeO, утворюючи нерозчинні MnO, SiO₂, Al₂O₃, які переходять у шлак. Процес плавки у 300-тонному конверторі триває 50-60 хв. Готову сталь зливають не через горловину, а через спеціальний отвір, що запобігає перемішуванню металу і шлаку.

Киснево-конверторний спосіб виробництва сталі не потребує значних витрат, він у 5-6 разів продуктивніший за мартенівський і електричний. Проте два останні способи також мають свої переваги.

Виробництво сталі в мартенівських печах здійснюють з використанням переробного чавуну (твердого або рідкого) і брухту. Іноді замість брухту використовують залізну руду. Як паливо використовують доменний, коксувальний або природний газ, а також мазут або нафту; флюс - вапняк CaCO₃ (6-12 % від маси металу).

Мартен - регенеративна полуменева піч (рис. 6.5), в якій висока температура одержується за рахунок згоряння газу над плавильним простором ((1750-1800°C). Газ і повітря, що надходять до печі, попередньо нагрівають у регенераторах до 1200-1250°C. Підігрівання продуктів горіння забезпечують у робочому просторі печі при згорянні палива температурою близько 2000°C. У разі використання рідкого палива нагрівають лише повітря, а нафту або мазут подають через форсунки, розташовані в каналах головок печі.

Основну частину печі (робочий простір-А) обмежує склепіння (10), задня і передня стінки, головки (9) з бокових сторін і под (6). Передня стінка має завалонні вікна (11) для завантаження шихти, відбору проб і спостереження за процесом плавки. Нижня частина задньої стінки має отвори для випуску сталі та шлаку. У головках печі (2) розташовані канали (7, 8), через які надходять газ і повітря, а також уводяться продукти горіння. У регенераторах (4, 5) з вертикальними каналами і вогне-

футеркою насадкою нагрівають газ і повітря. Через нижні канали (2, 3) до них надходять газ і повітря, вводяться продукти горіння. Періодичним перемиканням клапанів (1) змінюють напрямок руху потоків газу і повітря, продуктів горіння. Залежно від характеру кладки (футеровки) поду і стінок печі поділяють на кислі й основні. Використання кислих печей обмежене.

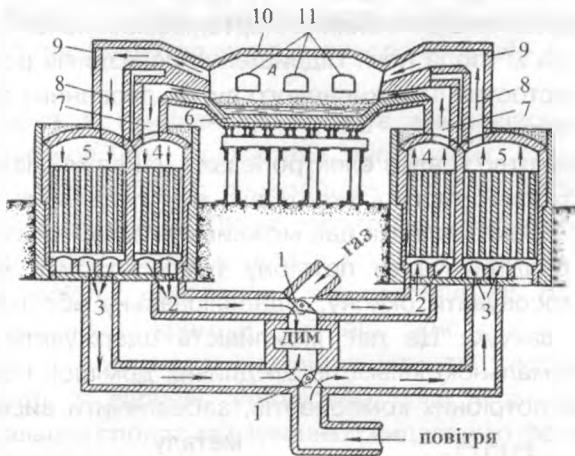


Рис. 6.5. Схема мартенівської печі: А - робочий простір; 1 - клапани; 2, 3, 7, 8 - канали для подачі газу і повітря; 4, 5 - регенератори; 6 - под; 9 - головки; 10 - склепіння; 11 - заволочні вікна

Процес мартенівської плавки в печі з основною футеркою поділяють на три періоди: плавлення, кипіння, розкислення. Під час плавлення до печі подають найбільшу кількість тепла, відбувається окислення кремнію, марганцю, сірки, фосфору. Оксиди реагують з флюсами і переходять у шлак. Далі починається кипіння сталі з активним окисленням вуглецю в металі. У процесі кипіння здійснюють хімічний контроль. Коли вміст вуглецю досягає бажаного, а кількість сірки і фосфору стає мінімальною, кипіння припиняють і починають розкислення сталі феромарганцем, феросиліцієм, алюмінієм. Кінцеве розкислення сталі

алюмінієм і феросиліцієм здійснюють під час випуску сталі у розливальному ковші. Процес мартенівської плавки залежно від об'єму печі триває 6-14 год.

За ступенем розкислення сталь поділяють на киплячу (мас газові вкраплення), напівспокійну і спокійну (гази відсутні). Киплячу сталь використовують для невідповідальних деталей, напівспокійну - для виготовлення дроту, конструкцій; спокійну - для виготовлення ресор, колінчастих валів тощо.

Продуктивність вітчизняних мартенівських печей становить майже 10 т на м² пода печі. Підвищення показників роботи печі досягають застосуванням кисневого дуття, двованних печей, автоматизації процесу.

Виробництво сталі в електропечах - найважливіший спосіб одержання сталей високої якості для відповідальних виробів і інструменту. Електроплавка дає можливість здійснювати швидке нагрівання і підтримувати потрібну температуру в межах до 2000°C, застосовувати окисну, відновлювальну або нейтральну атмосфери, вакуум. Це дає можливість одержувати сталі та сплави з мінімальною кількістю шкідливих домішок і оптимальним вмістом потрібних компонентів, забезпечити високу якість металу.

Електроплавку здійснюють у дугових та індукційних печах.

Електродугова піч (рис. 6.6) складається з сталевого циліндра зі сферичним або похилим дном, футерованого вогнетривкою цеглою. Робочий простір печі зверху має склепіння (4) з отворами для графітованих електродів (3) діаметром 350-550 мм.

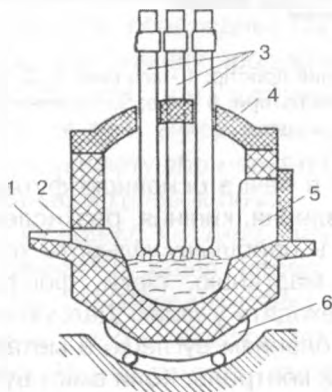


Рис. 6.6. Схема електродугової печі: 1 - жолоб; 2 - отвір для випуску металу; 3 - електроди; 4 - склепіння; 5 - вікно; 6 - механізм нахилу печі

На електроди подають електричний струм напругою 200-600 В і силою 1-10 кА. Джерелом тепла є електрична дуга, що утворюється між електродами і шихтою. У стінці корпусу розташоване вікно (5) для завантаження шихти і спостереження за ходом плавки, а також отвір для випуску металу (2) зі змінним жолобом (1). Механізмом (6) піч можна нахилити для завантаження або зливання сталі та шлаку. Електродугові печі мають об'єм 0,5-400 т. Сталь виготовляють здебільшого у печах з основною футеровкою плавкою з окисненням або без окиснення домішок.

Плавка з окисненням нагадує мартенівський процес і застосовується для одержання вуглецевих сталей. Шихтою служить сталевий брухт, переробний чавун, кокс для навуглецювання і 2-3 % вапна. Після завантаження печі до електродів підводять струм, виникає дуга з температурою 3500°C. Плавка має два періоди: окислення і відновлення. На початку плавки залізо, марганець, кремній і вуглець окислюються киснем, що надходить з повітря, з оксидів шихти та жаровини. Оксиди взаємодіють з вапном, утворюючи шлак. Наявність у шлаку оксиду кальцію сприяє зв'язуванню і видаленню фосфору. Період відновлення включає процеси розкислення сталі, видалення сірки і доведення вмісту компонентів до потрібної кількості. Для цього до печі подають флюс (вапно, фтористий кальцій, кокс, феросиліцій). Кокс і феросиліцій відновлюють оксид заліза, кількість його у шлаці зменшується і FeO переходить з металу в шлак, де відновлюється на границі шлак - метал. Завдяки цьому сталь не забруднюється домішками (SiO_2 , MnO , Al_2O_3) на відміну від звичайного розкислення. Присутність у шлаці CaO інтенсивно видаляє сірку. Тому в електросталі її вміст не перевищує 0,015 %. У разі необхідності наприкінці періоду відновлення сталь розкислюють феросиліцієм або алюмінієм.

Плавка без окислення застосовується для виготовлення легованих сталей з брухту або відходів відповідного складу. Процес зводиться до переплаву і введення деяких компонентів сталі.

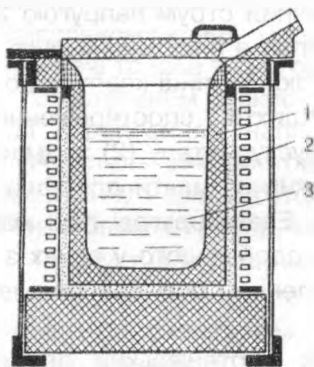


Рис. 6.7 Схема індукційної печі: 1 - вогнетривкий тигель; 2 - мідний індуктор з водяним охолодженням; 3 - рідкий метал

Індукційна піч (рис. 6.7) складається з тигля з кришкою (склепінням) і водоохолоджуваного індуктора змінного струму з частотою 500-2000 кГц. Електричний струм збуджує в металі вихрові струми з високою тепловою дією, які нагрівають його до розплавлення. Індукційні печі виготовляють об'ємом від десятків кілограмів до 5 т (часом 25-30 т). Плавку здійснюють переплавом відходів легированих сталей або скрапу вуглецевих сталей і феросплавів. Шлаком є

вапно і плавиковий шпат (в основних печах) або бій скла та інші матеріали, багаті на SiO_2 (в кислих печах). Завдяки індукційним печам одержують сталь з невисоким вмістом вуглецю і газів; здійснюють плавку у вакуумі або захисній атмосфері; переміщують рідкий метал; вирівнюють хімічний склад за рахунок електродинамічних сил, що виникають у процесі плавки. Тривалість плавки у печі об'ємом 1 т становить близько 45 хв., витрати електроенергії на виплавку 1 т сталі - 600-700 кВт/год.

6. Як здійснюють розливу сталі та чавуну?

Розливка рідкого металу - важлива операція металургійного і ливарного виробництва, яка значною мірою визначає якість металу і готового виробу. На якість виливків впливає температура розливки рідкого металу, тривалість заливки, заповнення розплавом ливникової системи та ін.

Недогрітий метал погано заповнює порожнини форми, призводить до браку (недолив); перегрітий метал спричинює утворення значних раковин усадки і газових порожнин, збільшує пригар формівної й стрижневої сумішей. Оптимальна темпера-

Металургія і ливарне виробництво

тура розливки сталі становить $1390-1550^{\circ}\text{C}$ (відповідно для великих і дрібних виливків), чавуну - $1220-1400^{\circ}\text{C}$.

Існує два способи розливки:

у виливниці (ливарні форми) і безперервної розливки. З плавильної печі рідкий метал випускають у ливарний ківш (рис. 6.8), обладнаний сталевим кожухом і футерований вогнетривким шамотом. У днище ковша вставляють стакан з шамоту або магнезиту з отвором для випуску сталі. Отвір стакана закривають пробкою з вогнетривкого матеріалу. Вона закріплена на сталевому стрижні стопора, футерованого шамотними трубками. У верхній частині стопор з'єднаний з пристроєм, що закриває і відкриває отвір ковша.

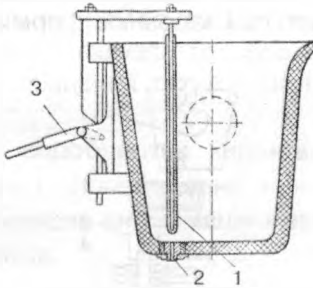


Рис. 6.8. Ливарний ківш для розливки сталі: 1 - стопор; 2 - стакан; 3 - стопорний механізм

Стопорні ковші для розливки сталі об'ємом (1-6 т) обладнують одним стопором, більші (8-10 т) - двома. Ковші менших розмірів (250-800 кг) для розливки чавуну без стопора (чайникові) оснащені вертикальною перегородкою, яка захищає метал від попадання у форму шлаку. Ручні ковші (25-60 кг) мають носі, а ковші об'ємом 5-16 кг - спеціальний держак.

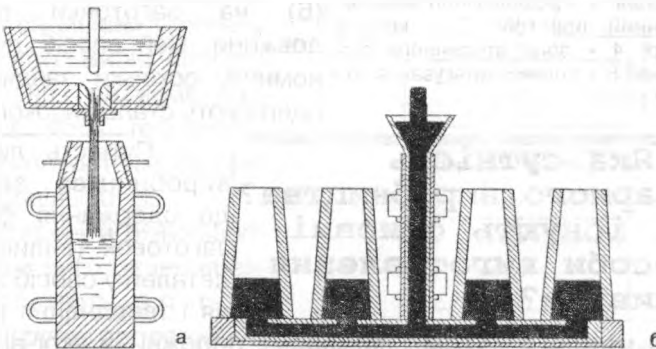


Рис. 6.9. Схема розливки сталі зверху (а) і сифоном знизу (б)

Розрізняють два способи розливки сталі у форми: зверху і сифоном (знизу). При розливці зверху кожен виливничий (форму) заповнюють окремо (рис. 6.9,а), а при розливці сифоном сталь з ковша надходить до ливника (стояка) і знизу по каналах підіймається і заповнює форми (рис. 6.9,б). Обидва способи широко застосовуються.

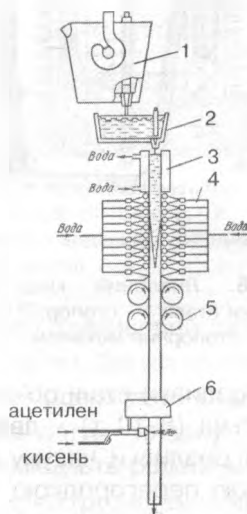


Рис. 6.10. Схема безперервної розливки сталі: 1 - розливочний ківш; 2 - проміжний пристрій; 3 - кристалізатор; 4 - зона вторинного охолодження; 5 - ролики витягування; 6 - газовий різак

Спосіб безперервної розливки порівняно новий, прогресивніший. Сталь з ковша (рис. 6.9) надходить у проміжний пристрій (2), далі - до кристалізатора (3) з міді, який охолоджується водою. Спочатку метал кристалізується на дні кристалізатора (плита-затравка). Після заповнення кристалізатора металом вмикають механізм витягування металу, відбувається вилівка в зону вторинного охолодження (4) за допомогою роликів (5). Далі безперервний вилівок автоматично

розрізається головним різаком (6) на заготовки потрібної довжини. Цей спосіб дуже екологічний, оскільки завдяки йому одержують сталь високої якості.

7. Яка сутність ливарного виробництва? Які існують основні способи виготовлення виливків?

Сутність ливарного виробництва зводиться до одержання фасонних заготовок (виливків) або деталей у спосіб заливання і тверднення розплавленого металу в спеціальній формі, порожнина якої відповідає конфігурації майбутнього виробу. Після тверднення, охолод-

Сутність ливарного виробництва зводиться до одержання фасонних заготовок (виливків) або деталей у спосіб заливання і тверднення розплавленого металу в спеціальній формі, порожнина якої відповідає конфігурації майбутнього виробу. Після тверднення, охолод-

ження, вилучення з форми і механічної обробки виливка одержують потрібну деталь. Завдяки методам точного лиття одержують вже готову деталь, що не потребує подальшої механічної обробки. Більша частина виливків виробляється зі сплавів на основі заліза (чавуну і сталі). Проте роль виливків з сплавів інших металів також дуже велика, особливо в галузях точного машинобудування, атомної енергетики, авіаційної техніки, приладобудування.

Розвиток сучасного ливарного виробництва характеризують два основні напрями: розробка і впровадження точних, маловідходних методів лиття та комплексна механізація і автоматизація процесів виробництва виливків.

Основними способами ливарного виробництва вважають лиття в піщано-глинистих і металевих формах; лиття під тиском; в оболонкових формах; по моделях, що виплавляються; відцентрове лиття; електрошлакове; під низьким тиском; з вакуумним всмоктуванням; витискуванням і рідкою штамповкою; з інтенсивним тепловідбором тощо. Вибір способу виготовлення виливків визначається його технологічними можливостями і економічною доцільністю.

Численні й різноманітні операції виготовлення виливків поділяють на п'ять основних груп: виплавлення металу; виготовлення форм;



Рис. 6.11. Схема технологічного процесу виготовлення виливка

розливання металу і охолодження виливків; первинна обробка виливків, вибивка, обрубка; термічна обробка і контроль якості (рис. 6.11). Специфічними для ливарного виробництва є операції виготовлення форм, розливка (заливка), тверднення і охолодження виливків. Явища, які відбуваються під час здійснення цих операцій, називаються ливарними процесами.

8. Які особливості переходу металів з рідкого стану в твердий?

Агрегатний стан металів зумовлює характер зв'язку між їх атомами. У газоподібному стані розташування атомів хаотичне і вони весь час змінюють

своє місце знаходження. У рідкому та аморфному стані існує так званий ближній порядок, який поширюється на кілька атомних відстаней. У твердому кристалічному стані існує дальній порядок - система розташування атомів у межах певного кристала, що поширюється до мікроскопічного і навіть макроскопічного рівня. Тверді метали практично завжди є кристалічними тілами. У процесі охолодження рідкого металу нижче певної температури в його окремих мікрооб'ємах починається утворення і ріст кристалів. Вони, об'єднуючись між собою, утворюють мікроструктуру. Процес утворення структури під час переходу металу з рідкого у твердий стан називають кристалізацією. Якщо перехід металу з рідкого стану в твердий розглядають як суто тепловий процес, ігноруючи структуроутворення, тоді його умовно називають твердненням.

Таким чином, основними особливостями переходу металу з рідкого в твердий стан можна вважати: 1) збільшення сил притягування між атомами, які зумовлюють побудову атомно-кристалічної ґратки з дальнім порядком при певній температурі кристалізації (атомний рівень); 2) одночасне утворення центрів кристалізації у багатьох мікрооб'ємах, з яких виростають кристали з подальшим утворенням мікроструктури (мікроскопічний рівень); 3) послідовне тверднення вилівка, зумовлене охолоджен-

ням, під час якого границя між твердою і рідкою частинами виливка (фронт кристалізації) переміщується з часом (макроскопічний рівень).

Взаємодією цих процесів визначаються особливості формування структури і властивості реальних виливків.

Для одержання якісних виливків ливарні сплави повинні забезпечувати певний рівень специфічних для литва технологічних (ливарних) властивостей. Характеристики ливарних сплавів, які визначають їх поведінку під час формоутворення і виготовлення

9. Які існують ливарні властивості сплавів?

виливків, а також їх якість, називають ливарними. Основними з них є рідкотекучість, усадка, схильність до ліквідації і поглинання газів.

Рідкотекучість - це здатність металу вільно переміщуватися і заповнювати форму, відтворюючи всі її контури. Недостатня рідкотекучість спричинює утворення недоливів у вузьких перерізах виливків. Метал з високою рідкотекучістю заповнює всі порожнини найскладнішої ливарної форми. Рідкотекучість залежить, передусім, від температури і хімічного складу сплаву.

Підвищення температури рідкого металу підвищує рідкотекучість, дає можливість одержувати більш тонкостінні вироби. Такі елементи, як кремній, вуглець, фосфор підвищують рідкотекучість, сірка - знижує. Так, чавуни характеризуються кращою рідкотекучістю, оскільки мають підвищений вміст вуглецю порівняно зі сталями. Мінімальна товщина стінки виливків, через їхню різну рідкотекучість, різна. Для дрібних виливків вуглецевої сталі вона дорівнює 5-7 мм, середніх - 10-12 мм, великих - 15-20 мм; для сірого чавуну відповідно 3-4 мм, 8-10 мм і 12-15 мм.

На практиці рідкотекучість визначають за допомогою проби у вигляді спіралі, довжину якої використовують для виміру рідкотекучості сплавів.

Усадка - це властивість металів і сплавів зменшувати свій об'єм і лінійні властивості виливків під час охолодження і тверд-

нення. Зв'язок об'ємної (E_0) і лінійної (E_L) усадки з об'ємом (V_ϕ , $V_{\text{вил}}$) і розміром (L_ϕ , $L_{\text{вил}}$) відповідно форми і виливка описують рівняння:

$$E_0 = \frac{V_\phi - V_{\text{вил}}}{V_\phi} \cdot 100 \%$$

$$E_L = \frac{L_\phi - L_{\text{вил}}}{L_\phi} \cdot 100 \%$$

Наслідком об'ємної усадки є утворення у зливках і виливках усадочних раковин і пористих зон. Головна умова запобігання утворенню усадочних раковин і пор - безперервне постачання рідкого металу аж до тверднення до зони кристалізації. Для цього використовують раціональну ливникову систему з достатнім надливом, холодильники, спрямовують тверднення металу в бік надливу. Забезпечення повільного охолодження металу в зоні надливу зумовлює переміщення дефектів усадки в надлив, який відрізають.

Лінійна усадка супроводжується зменшенням лінійних розмірів твердого виливка при охолодженні. Наявність перепонов для усадки, малоподатливих стрижнів і формовочної суміші може призвести до утворення гарячих тріщин і жолоблення виробів. Величина лінійної усадки може бути різною, залежить від хімічного складу сплаву, температури розливання металу та інших факторів. Лінійна усадка майже утричі менша за об'ємну. Лінійна усадка сірого чавуну у середньому дорівнює 0,8-1,2 %, сталі 1,8-2,2 %, кольорових сплавів - 1,3-1,8 %.

Ліквация - це хімічна неоднорідність сплаву по перерізу виливка, що виникає під час кристалізації. Неоднорідність хімічного складу і структури призводить до неоднорідності фізико-механічних властивостей у різних об'ємах виливка. Розрізняють зональну і дендритну ліквацию. Зональна ліквация створює хімічну неоднорідність в об'ємі всього виливка, а дендритна - у межах одного зерна (дендрита). Крім хімічного складу, на ліквацию впливають швидкість охолодження, конфігурація виливка та інші

технологічні фактори. Підвищення швидкості охолодження при твердненні сприяє зменшенню ліквацийних явищ.

Газопоглинання - це здатність розплавлених сплавів розчиняти гази - кисень, азот, водень тощо. Під час охолодження металу в ливарній формі розчинність газів зменшується і внаслідок їх виділення у виливках можуть утворюватися газові раковини і пори. Щоб запобігти цьому, використовують формовочні стрижневі суміші з високою газопроникненістю, плавлення у вакуумі або середовищі інертних газів.

Модельний комплект для виготовлення виливків складається з ливарного оснащення, що забезпечує одержання виливків потрібної форми і розмірів з урахуванням лінійної усадки і припусків на механічну обробку. До модельного комплекту (рис. 6.12) входять: модель майбутнього виливка, моделі ливникової системи, один або кілька стрижневих ящиків, підмодельна дошка (для ручної формовки) або модельна плита (для машинної формовки), опоки. Конструкція модельного комплекту повинна забезпечувати зручне набивання форми і видалення моделі з форми і стрижня з стрижневого ящика. Елементи комплекту не повинні змінювати своїх розмірів з часом, і при багаторазовому використанні, мають бути зручними і легкими.

10. Що таке модельний комплект?

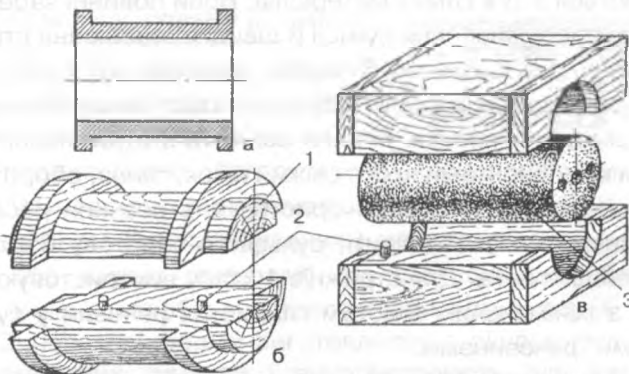


Рис. 6.12. Модельний комплект: а - виливок; б - модель роз'ємна; в - стрижневий ящик зі стрижнем; 1 - стрижневий знак; 2 - шипи для центрування; 3 - стрижень

Модельний комплект виготовляють з твердої деревини (клен, бук, береза), з металу (сплавів алюмінію), пластмас і вспіненого полістеролу.

Моделі - це пристосування для одержання у формувальних суміші відбитків (порожнини), що відповідають формі виливків. Отвори і порожнини всередині виливків одержують за допомогою стрижнів з піску, встановлених у форми під час їх монтування. Розмір моделей, порівняно з розміром виливка, збільшують на величину лінійної усадки металу і припусків на механічну обробку. Для виливків простої конфігурації використовують нероз'ємні моделі, для складних виливків моделі виготовляють роз'ємними, що дає можливість видаляти їх, не руйнуючи форми. З цією ж метою вертикальні стінки моделі (перпендикулярні до площини роз'єму форми) виготовляють з ухилом 0,5-3 % залежно від висоти моделі. На відміну від виливка, модель має замість отворів виступи (стрижневі знаки), що утворюють у формі відповідні відбитки - заглиблення. В них вкладають стрижень, виготовлений з використанням стрижневого ящика.

Стрижневі ящики (стрижневі форми), подібно до моделей, мають ливарний ухил, можуть бути роз'ємними і нероз'ємними, виготовляються з тих самих матеріалів. Вони повинні забезпечувати рівномірне ущільнення суміші й швидке видалення стрижня.

Стрижні поділяють на 5 класів залежно від конфігурації, перерізу і розміщення у формі. Стрижні I класу використовують у найбільш складних умовах. Їх виготовляють з стрижневої суміші основними компонентами якої є свіжий пісок, глина, оборотна суміш. Як з'єднуючі речовини використовують розчини рослинних масел і каніфолі в уайт-спіриті, сульфітно-спиртову барду, добавки деревного пека. Для стрижнів 1 класу використовують свіжий пісок з мінімальним вмістом глинистих речовин у суміші, зі з'єднуючими речовинами.

Моделі ливникової системи та елементи з стрижневої суміші виготовляють аналогічно описаному.

Модельний комплект для машинної формовки складається з металевих модельних плит і змінного модельного оснащення: координатних підмодельних плит і підмодельних плит зі змінними вставками. На модельній плиті монтуються і закріплюються гвинтами металеві півмоделі й моделі ливникової системи. Оскільки під час формовки на машинах кожна з півформ виготовляється окремо, то півмоделі закріплюють на координатних плитах, що забезпечують правильне з'єднання півформ при монтажі. Координатні плити мають отвори, позначені літерами по горизонталі й цифрами по вертикалі, тобто кожен отвір має свій шифр (наприклад А4, В6). Це дає можливість швидко і точно закріплювати модель спрямовуючими штифтами і болтами. Підмодельні плити зі змінними вставками складаються з металевої рами і змінних металевих або дерев'яних частин (вставок) з прикріпленими до них моделями. Конструкція уможливлює швидке здійснення заміни моделей і забезпечує надійне кріплення.

Для виготовлення ливарних півформ з формуючих сумішей використовують міцні металеві рами різної форми - опоки. Стінки опоки виготовляють з отворами для зменшення ваги і видалення газів, для кращого зчеплення суміші з опокою. Опоки з'єднують штирями і центруючими отворами у приливах, скріплюють скобами і спеціальними пристроями. Виготовляють опоки зі сталі, сірого чавуну, сплавів алюмінію.

При виготовленні виливків застосовують спеціальні ливарні форми, які відрізняються терміном використання (одно- багаторазові), технологією виготовлення (ручна, машинна, з виплавленням або випалюванням моделей тощо), станом перед заливанням металу (сухі, підсушені, сирі, само- або хімічно тверднучі). На сьогодні існує близько ста різних видів і способів виготовлення ливарних форм.

Одноразові форми виготовляють з піщано-глинистих і піщано-смоляних сумішей і використовують для виготовлення лише одного вилівка. Одноразову форму роблять роз'ємною

11. Які існують різновиди ливарних форм?

(верхня і нижня частини півформи). Нероз'ємні одноразові форми виготовляють з використанням плавких моделей. Після тверднення металу при видаленні виливка одноразову форму руйнують. Близько 60 % всіх виливків з чавуну і сталі одержують литтям у піщано-глинисті форми. Цим способом виготовляють дрібні та великі виливки простої і складної форми не тільки із залізовуглецевих, але й кольорових сплавів (рис. 6.13).

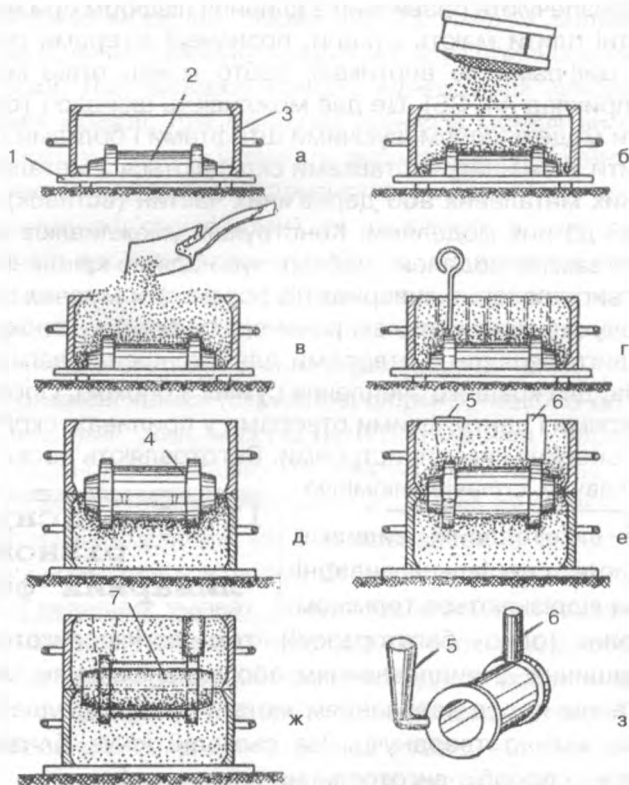


Рис. 6.13. Послідовні операції формовки виливка втулки по моделі у двох опоках: 1 - підмодельна плита; 2 - півмодель; 3 - нижня опока; 4 - модель; 5 - стояк ливника; 6 - випор; 7 - стрижень

Багаторазові роз'ємні форми витримують від кількох десятків до сотень заливок. Після тверднення металу таку форму не руйнують, а розкривають для видалення виливка, після чого знову збирають, готуючи до наступної заливки. Багаторазові форми виготовляють із шамоту, алебастру, азбесту, цементу, інших вогнетривів з використанням рідких самотверднучих сумішей.

Металеві багаторазові форми (кокілі) виготовляють з чавуну, сталі, міді, мідних і алюмінієвих сплавів. Термін використання кокілів залежить від температури плавлення сплаву, з якого виготовляють вилівок, покриття внутрішньої частини кокілю, умов охолодження. У зв'язку з високою вартістю кокілів використовують у серійному виробництві. Існуючі конструкції кокілів дозволяють швидко вилучати вилівок з форми і готувати її до наступної операції. В одному кокілі можна виготовити кілька сотень виливків зі сталі, кілька тисяч виливків із чавуну, десятки тисяч виливків з кольорових металів.

Ливникова система - це система каналів, по яким рідкий метал надходить до ливарної форми. Вона складається з ливникової чаші (2), стояка (3), шлакоуловлювача (4) і каналів живлення (живильників) (5) (рис. 6.14).

12. Що таке ливникова система?

Ливникова система повинна забезпечувати безперервне надходження розплаву в форму, живлення виливка для компенсації усадки, запобігати руйнуванню форми і попаданню до неї разом зі розплавом шлаку і повітря.

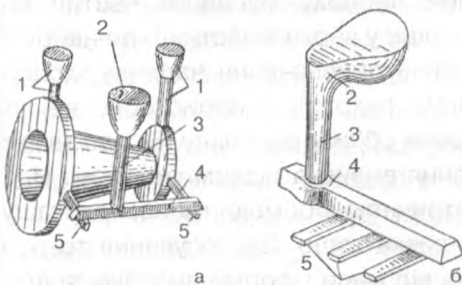


Рис. 6.14. Ливникова система: а - розташування ливника і випору на виливку; б - елементи ливникової системи; 1 - чаша і стояк випорів (надливів), 2 - ливникова чаша, 3 - стояк; 4 - шлакоуловлювач; 5 - живильники

Ливникова чаша зменшує розмиваючу дію динамічного тиску струменя металу і частково затримує шлак. Стояк, що з'єднує ливникову чашу з шлакоуловлювачем, роблять конусним. Шлаковик трапецеїдального (іноді гребінчастого) перетину розташовують у верхній частині форми в площині роз'єму. Зміна напрямку руху металу в шлакоуловлювачі гальмує його текучість, шлак краще спливає і затримується. Живильники розміщуються в нижній півформі у площині роз'єму, підводячи метал безпосередньо в порожнину форми. На високих частинах виливків роблять також спеціальні канали (випори) для виходу газу.

Сума перерізу всіх живильників (F_{Σ}) не повинна бути меншою від площі перерізу шлакоуловлювача ($F_{\text{ш}}$) і стояка ($F_{\text{с}}$): $F_{\Sigma} \leq F_{\text{ш}} \leq F_{\text{с}}$. Дотримання цього співвідношення забезпечує постійне заповнення ливникової системи рідким металом, надійне відокремлення шлаку, повітря і окислів від металу виливка.

Залежно від розміру, форми виливка, складу і ливарних властивостей сплаву ливникові системи можуть мати різну будову: верхню, нижню, сифонну, ярусну, вертикально-щілинну. Заливання металу в форму здійснюють безперервним потоком. До кінця заливання ливникова чаша повинна бути заповнена металом повністю, щоб шлак не попав у форму. Процес заливання закінчують після заповнення металом випорів і надливів.

13. Що таке надлив?

Надлив - це додатковий об'єм металу, розміщений поблизу масивних частин виливків (частіше у верхній частині), де найбільше виявляється усадка. Основне призначення надливу - одержання виливків без усадочних раковин і пористості, які утворюються внаслідок зменшення об'єму розплаву під час тверднення і недостатнього живлення виливка рідким металом. Надливи розрізняють за їх геометричною формою, місцем розташування, умовами живлення виливка тощо. Застосування того чи іншого типу надливу залежить від маси і форми виливка, усадки металу та інших факторів.

Для виготовлення великих виливків із сталі використовують відкриті надливи прямого живлення. Їх іноді застосовують також для доливання металу по мірі зниження його рівня, а також як випор і збірник забруднень, що спливають. У багатьох випадках застосовують закриті надливи, що дає значну економію металу (до 5 %). Закриті надливи, що діють під атмосферним тиском, створюють з використанням спеціальних газопроникних стрижнів з піщано-маслянистих сумішей. Надливи під тиском газів функціонують завдяки наявності в порожнині надливу спеціального патрону з газотворною речовиною (крейди з додаванням коксу). Патрон починає працювати після утворення на поверхні надливу твердої корки металу, гази створюють тиск і витісняють рідкий метал у виливок. Для полегшення відокремлення надливів застосовують спеціальні стрижні - пластини або стрижні-діафрагми з шамотно-глинистих сумішей, кераміки тощо.

14. Які властивості повинні мати формівні й стрижневі матеріали?

У ливарному виробництві поширено одержання литих виробів у одноразових формах. Матеріали, з яких виготовляють ливарні форми, називаються формівними сумішами. Для забезпечення високої якості виливків формівні й стрижневі суміші повинні мати певні механічні, технологічні та фізичні властивості.

Розглянемо основні механічні властивості сумішей.

Міцність. Здатність суміші протистояти статичним і динамічним навантаженням під час виготовлення, монтажу, транспортування та експлуатації ливарної форми (стрижня). Стандартною характеристикою сирих сумішей є поріг міцності при стискуванні $\sigma_{ст}$, а для сухих форм - поріг міцності при розтягуванні σ_p . Для сумішей глини і піску $\sigma_{ст} = 3-7$ МПа, $\sigma_p = 8-20$ МПа.

Пластичність. Здатність матеріалу давати хороший відбиток моделі й зберігати його ферму після видалення моделі.

Податливість. Здатність матеріалу ливарної форми децю стискуватися (без руйнування) під дією стискуючих сил, що виникають у процесі усадки при твердненні та охолодженні металу.

Поверхнева міцність. Суміш спроможна протистояти дії струменя металу під час його заливки. Недостатня поверхнева міцність призводить до осипання частинок формівної суміші і засмічення ними металу виливка.

Визначимо основні технологічні властивості сумішей.

Газопроникненість. Через стінки форми проходять гази, що виділяються під час заливання рідкого металу. Це одна з найважливіших характеристик формівних сумішей. У разі недостатньої газопроникненості у виливках можуть утворюватися рихлоти і порожнини (раковини). Для оцінки газопроникненості користуються коефіцієнтом K , що визначається експериментально. Для піщано-глинистих сумішей $K = 30-120$ одиниць.

Текучість. Спроможність частинок формівної суміші переміщуватися при мінімальних зусиллях у процесі формовки, обтікати модель і забезпечувати однакову щільність різних частин форми (стрижня) без утворення рихлот і порожнин.

Термохімічна стабільність. Це здатність форми витримувати високу температуру рідкого металу без оплавлення або хімічної взаємодії з ним. При оплавленні формівної суміші знижується її газопроникненість, з'являється плівка пригару.

Довговічність. Формівні суміші зберігають свої властивості за умов їхнього багаторазового використання.

Крім цього, формівні суміші повинні легко видалятися з форм і порожнин виливків при їхньому вибиванні після охолодження, бути негігроскопічними, не поглинати вологу з повітря протягом тривалого часу після просушування.

Основними теплофізичними властивостями формівних сумішей є теплопровідність і питома теплоємність, які істотно впливають на швидкість кристалізації та тверднення металу, а також на температурно-часові умови його подальшого охолодження, зумовлюючи характер структуроутворення і властивості виливків.

Склад формівних сумішей добирають з урахуванням особливостей технології лиття, хімічного складу ливарного сплаву, маси і конфігурації виливків, вартості формівних матеріалів тощо.

Основу формівних сумішей складають кварцевий пісок і глина, зволожені водою. Наповнювачем є пісок, а зв'язуючою речовиною - глина (8-12 % об'єму). Пісок забезпечує газопроникненість і вогнетривкість. Підвищена газопроникненість

досягається застосуванням більш крупних фракцій піску і високої концентрації зерен у суміші. Для підвищення газопроникненості та податливості до суміші додають тирсу або торф (2-3 %), які під час просушування форми вигорають, утворюючи пори. Глина покращує вогнетривкість, міцність і пластичність, але погіршує газопроникненість і податливість.

Оскільки стрижні працюють у складних умовах, суміш для них повинна забезпечувати більш високу міцність, податливість і газопроникненість. Для тонких і складної форми стрижнів використовують зв'язуючі добавки - оксоль, рідке скло, смоли, декстрин тощо.

Для запобігання пригару до суміші додають кам'яновугільний пил, тальк, графіт, що у вигляді припили наносяться на поверхню форми виливків із чавуну. Для форм і стрижнів сталевих виливків виготовляють протипригарні фарби з маршаліту, магнезиту, циркону.

За призначенням формівні суміші поділяють на облицювальні, наповнювальні та єдині.

Облицювальну суміш застосовують у разі ручного формування для утворення поверхні ливарної форми, що контактує з рідким металом. Її готують зі свіжих піску і глини, додають протипригарні матеріали і наносять на модель шаром у 15-20 мм.

Наповнювальна суміш поверх облицювальної заповнює решту ливарної форми. Її виготовляють з оборотної суміші після вибивання опоки, додаючи 5-10 % свіжих піску і глини.

**15. Як
класифікують
формівні суміші
та які матеріали
використовують
для них?**

Єдина суміш застосовується для набивки всього об'єму ливарної форми у масовому виробництві у разі машинного формування. Її готують з оборотної суміші, додаючи до 50 % свіжого піску і глини.

Розглянемо форми, що розрізняють відповідно до стану перед заливкою металу.

Сирі форми з оборотної суміші без попереднього просушування. Застосовуються у виготовленні виливків невідповідального призначення з чавуну, сталі, кольорових металів масою до 3000 кг.

Напівсухі (підсушені) форми з облицювальної суміші з 2-4 % швидкотверднучих зв'язуючих домішок. Їх застосовують для виготовлення відповідальних виливків зі сталі та чавуну.

Сухі форми перед заливкою металом піддають просушуванню для поліпшення їх якості, їх виготовляють з суміші з підвищеним вмістом глини і з меншою кількістю оборотної суміші. Сухі форми використовують лише для одержання відповідальних і великих (понад 1 т) виливків.

Хімічно твердіючі форми з рідких самотверднучих сумішей (РСС), що містять хімічні реагенти, які сприяють переходу суміші у рідкий стан. Завдяки цьому суміш заповнює всі ділянки форми, що вилучає необхідність її ущільнення. За нормальної температури протягом 30-40 хв форми і стрижні з РСС тверднуть по всьому перерізу. Застосування РСС дає можливість механізувати і автоматизувати процеси формування.

16. Які особливості має структура литого металу?

Формування структури і властивостей литих виробів відбувається під впливом кількох факторів металургійного і технологічного характеру. До таких факторів відносять наявність домішок, температуру розливки і ступінь переохолодження, температурно-часові параметри кристалізації та охолодження металу.

Металургія і ливарне виробництво

Литий метал характеризує неоднорідність макроструктури, форми і розмірів зерен, хімічного складу, наявність макро- і мікронеоднорідностей у виробках.

Макроструктура зливка складається з трьох основних зон (рис. 6.15): дрібних кристалів; орієнтованих стовпчастих; дезорієнтованих рівновісних.

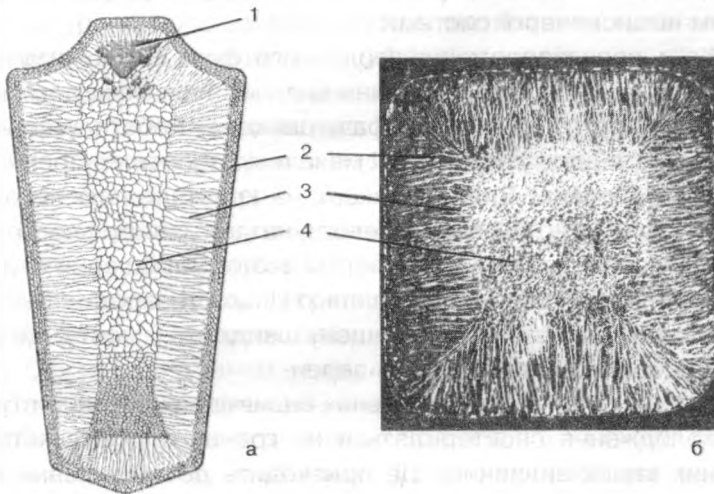


Рис. 6.15. Будова сталевго зливка у повздожньому (а) і попережному (б) перерізах: 1 - раковина усадки; 2 - зона дрібних неорієнтованих кристалів біля стінок виливниці; 3 - зона стовпчастих, витягнутих до центру зливка кристалів; 4 - зона рівновісних кристалів

Неоднорідність литої структури зумовлена ступенем переохолодження металу в процесі тверднення і наявністю домішок. Рушійною силою кристалізації є зниження рівня вільної енергії (за рахунок різниці температури теоретичної та фактичної). За утворення і зростання зародків твердої фази вільна енергія системи змінюється у двох протилежних напрямках: утворення

зародків викликає зменшення вільної енергії, а утворення границі поділу між рідкою і твердою фазами сприяє її збільшенню. Таким чином, атомам на поверхні металу притаманна вища потенційна енергія. За досить малих розмірів зародків вільна енергія системи збільшуватиметься, і лише досягнувши певного розміру зародка (критичного або рівноважного), вона зменшуватиметься. Зародки, що виникають, мають різні розміри. Здатними до росту є лише такі, зростання яких супроводжується зменшенням вільної енергії системи.

Крім переохолодження (головного фактора початку кристалізації), на структуроутворення впливає наявність домішок у рідкому металі (неметалевих фаз, оксидів). Робота утворення зародка на твердому вкрапленні менша від роботи утворення гомогенного зародка. Вплив домішок на кристалізацію не однаковий, а залежить від поверхневого натягу, ізоморфності кристалічних ґраток, топографії поверхні тощо. Збільшення ступеня переохолодження сприяє збільшенню кількості зародків (центрів кристалізації) і забезпечує підвищену швидкість їх росту. Це призводить до зменшення розмірів зерен.

Під час кристалізації реальних виливків найбільший ступінь переохолодження спостерігається на границі рідкого металу і холодних стінок виливниці. Це призводить до збільшення кількості зародків і швидкості їх росту (зона дрібних кристалів). Далі, завдяки спрямованому тепловідбору, кристали ростуть перпендикулярно до стінки виливниці (стовпчасті кристали). У центральній зоні тепло розподіляється рівномірно в усі боки, що сприяє формуванню рівновісних неорієнтованих кристалів. Загалом структура виливка неоднорідна. Це перший недолік литої структури.

Другий важливий недолік литої структури - несучільність. Її утворення зумовлене тим, що метал у твердому стані займає менший об'єм, ніж у рідкому. Усадка, що виникає, розподіляється у вигляді зосередженої раковини або зони дрібних раковин, порожнин і мікропор. Найгірший вплив на структуру і влас-

Металургія і ливарне виробництво

тивості металу має раковина усадки, поблизу якої сконцентрована найбільша кількість шкідливих домішок. Дрібні несучільності, якщо стінки їх не окислились, усувають гарячою механічною обробкою (кування, прокатування).

Третій недолік литого металу - хімічна неоднорідність (ліквация). Її утворення пояснюється тим, що в міру тверднення металу, рідка і тверда фази змінюють свій склад шляхом дифузійного перерозподілу атомів компонентів. Проте зі зниженням температури процес дифузії відстає від процесу кристалізації, що перешкоджає рівномірному розподілу атомів.

Розглянуті фактори значною мірою визначають також мікроструктуру литих виробів, яка формується у процесі кристалізації та охолодження виливків у твердому стані. Так, нагрівання сталі до високої температури, що значно перевищує A_{c3} (перегрів), призводить до утворення великого зерна і зниження рівня механічних властивостей. У разі прискореного охолодження відбувається нерівномірний ріст кристалів нової фази (фериту) в процесі фазової перекристалізації при поліморфному перетворенні. Сформована таким чином структура (відманштеттова) має низькі механічні властивості. Наявність відманштеттової структури (більш або менш розвиненої) є однією з ознак литої сталі. У виливках середнього і великого розміру, де охолодження йде повільно, вона може бути відсутня. Проте і в цих випадках пластичність і в'язкість литої сталі будуть нижчими від властивостей сталі, обробленої тиском.

Прискорене охолодження під час кристалізації сталевих виливків може призвести також до зміни вмісту вуглецю в евтектоїді. Так, наприклад, в доевтектоїдних сталях за умов прискореного охолодження частина надлишкового фериту не встигає виділитися з аустеніту до початку евтектоїдного перетворення. Тому аустеніт матиме знижений вміст вуглецю і евтектоїдна суміш, що утворюється з нього, також матиме занижену, порівняно з рівноважною (0,8 %C), концентрацію вуглецю. Продукт розпаду аустеніту в цьому випадку (псевдо-

перліт) призводить до порушення співвідношення структурних складових сталі. Зайнята ним площа стає більшою від площі перліту в рівноважній структурі цієї ж сталі.

Наведені недоліки структури сталевих виливків можна усунути у спосіб наступної термічної обробки. Тому вона є, у більшості випадків, обов'язковою операцією технологічного процесу виробництва сталевих литва.

Найбільше розповсюдження одержали два варіанти термічної обробки сталевих литва: нормалізація та нормалізація з наступним відпуском. Поліпшення властивостей литва досягають лише у разі правильно проведеної термічної обробки. Порушення температурного режиму може призвести до повторного виникнення великозернистої структури і зниження механічних властивостей.

17. Що таке модифікатор і модифікування металів?

Для подрібнення структури литого металу застосовують добавки певних хімічних речовин (модифікаторів), що впливають на процес кристалізації та структуроутворення. Процеси введення модифікаторів у рідкий метал і зміни структури внаслідок їхнього впливу називають модифікуванням (від лат. modifier - змінювати). Для модифікування використовують, наприклад, Al, B, Ti, Zr або комплексні модифікатори, що складаються з кількох елементів, різних за характером впливу на процес кристалізації.

Деякі модифікатори утворюють з домішками або газами в металі тугоплавкі сполуки. Такі сполуки, перебуваючи у розплаві як дрібні частинки, є додатковими центрами кристалізації. Інші модифікатори - поверхнево-активні щодо основного металу. Вони розташовуються на поверхні зростаючих кристалів і тим самим перешкоджають їх подальшому росту. В обох випадках зерно модифікованого металу дрібнішає, а механічні властивості поліпшуються. Якщо залізобуглецевий сплав (сталь) нагрівати

Металургія і ливарне виробництво

до температури 900-950°C, відбувається зростання розміру зерна і сталь після охолодження залишиться крупнозернистою. Модифікуванням досягають збереження дрібного зерна при нагріванні сплавів до високих температур, а також подрібнення і зміни форми структурних складових (наприклад, одержують чавун з кулястим графітом).

У зв'язку з підвищенням вимог щодо якості лиття, необхідністю одержання складних за конфігурацією або тонкостінних виробів з мінімальними допусками на механічну обробку, а також з метою механізації та автоматизації ливарного виробництва застосовують спеціальні способи виготовлення виливків.

На відміну від традиційного лиття з використанням разових форм (піщано-глинистих формівних сумішей), ці способи уможливають одержання якісніших виливків підвищеної точності щодо їх розмірів і конфігурації, з потрібною чистотою поверхні та комплексом характеристик литої структури. Крім цього, вони забезпечують високу продуктивність ливарного виробництва і низьку собівартість лиття. Кожен з видів лиття має свої особливості, які визначають технологічну і економічну доцільність їх застосування у кожному конкретному випадку.

Лиття у металеві форми (кокільне лиття) застосовують для виготовлення значної кількості однотипних виливків зі сталі, чавуну та кольорових металів. Кокілі виготовляють зі сталі або чавуну. З метою підвищення стійкості металевих форм та для запобігання відбілювання виробів з чавуну, внутрішню поверхню форми покривають вогнетривкими захисними сумішами або спеціальними фарбами, які уповільнюють швидкість відведення тепла від залитого металу. Виготовлення виливків у металевих формах складається з очищення кокілю від продуктів попередньої заливки; нанесення захисного покриття або вогнетривкого фарбування робочої поверхні; збирання форми і встанов-

18. Які різновиди і особливості технологій спеціальних способів лиття?

лення стрижнів; заливка металу і витримування його у формі розкриття кокілю і видалення з нього виливка.

При використанні металевих форм зникає потреба у модельно-опоковому обладнанні, формівних і стрижневих сумішах. Це значно покращує санітарно-гігієнічні умови праці, підвищує точність виготовлення і чистоту поверхні виробів.

Залежно від конструкції кокілі поділяють на роз'ємні та нероз'ємні. Роз'ємні кокілі (з вертикальним або горизонтальним роз'ємом) складаються з двох половинок, які центруються спрямовуючими штирями. Роз'ємні кокілі закриваються і розкриваються гідравлічними або пневматичними приводами. Ливникову систему розміщують у площині роз'єму кокілю. У разі необхідності одержання отвору або внутрішньої порожнини у виливку використовують піщані або металеві стрижні. Для видалення газів із форми під час заливки, крім випарів, у площині роз'єму по висоті кокілю прорізають спеціальні щілини глибиною 0,3-0,5 мм. Перед заливкою металеві форми підігрівають до 200-300°C.

Порівняно з піщано-глинистими формами металеві мають значно кращу (приблизно у 60 разів) теплопровідність, що забезпечує одержання дрібнозернистої структури виливків і підвищення властивостей металу. Кокіль дозволяє одержувати в ньому від 300 до 500 сталевих виливків масою 100-150 кг, близько 5000 невеликих виливків з чавуну, десятки тисяч виливків з кольорових металів.

До недоліків металевих форм відносять їхню досить високу вартість і трудомісткість виготовлення складних коклів, можливість утворення тріщин у виливках, пов'язаних з неподатливістю металеві форми. Проте за умов багатосерійного виробництва виливків з чавуну, сталі та кольорових металів простої форми з товщиною стінки 3-100 мм застосування кокільного лиття виправдане і економічно доцільне.

Відцентрове лиття (рис. 6.16) зводиться до одержання виливків шляхом заливання рідкого металу в металеву або піщано-глинисту форму, що обертається з заданою швидкістю про-

Металургія і ливарне виробництво

тягом усього процесу тверднення виливка. Під дією відцентрових сил, що виникають, рідкий метал притискується до стінок форми і, охолоджуючись, набуває її конфігурації. Оскільки метал твердне під тиском, його структура стає щільнішою, гази і неметалеві домішки відтісняються до центру обертання і потім легко видаляються при механічній обробці. Відцентрове лиття застосовують, в основному, для виготовлення виливків, що мають форму тіл обертання з отворами по центру (труби, втулки), а також фігурних виробів. Швидкість обертання форми залежить від діаметра виливка і густини розплаву. Її розраховують за формулою:

$$n = 5520 / \sqrt{r}$$

де: γ - густина сплаву;

r - внутрішній радіус виливка.

Вісь обертання форми може бути вертикальною, горизонтальною або з нахилом. У разі виготовлення виливків, діаметр яких значно більший за їхню довжину, вісь обертання розташовують вертикально. У випадках, коли діаметр виливків менший від довжини, вісь обертання розміщують горизонтально. При цьому вісь виливка збігається з віссю обертання форми, внутрішня порожнина утворюється без використання стрижнів, а товщину стінки визначає кількість залитого металу.

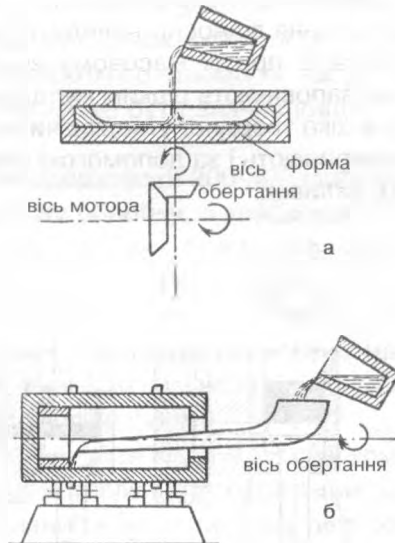


Рис. 6.16. Схема відцентрового лиття з вертикальною (а) і горизонтальною (б) вісями обертання

Для виготовлення дрібних фасонних виливків застосовують метод центрифугування, за якого вісь обертання форми може збігатися з віссю виливків. Метал заливають через загальний центральний ливник, від якого по радіальним живильникам він надходить до порожнини форми.

Відцентрове лиття як високопродуктивний спосіб застосовують переважно для виготовлення виливків зі сталі та чавуну, що забезпечує одержання щільної структури лиття без усадкових порожнин і рихлоти, якісне заповнення форми сплавами зі зниженою рідкотекучістю, одержання виливків з тонкими стінками. Відцентрове лиття труб, втулок, гільз тощо не потребує використання ливників, стрижнів, випорів. Проте під дією відцентрових сил посилюються ліквіаційні явища. Різностінність виливків і забруднення внутрішніх зон неметалічними вкрапленнями потребує збільшення припуску на механічну обробку виробів.

Лиття під тиском (рис. 6.17) застосовують здебільшого для виготовлення відносно невеликих виливків (до 50 кг) з кольорових сплавів при їх масовому виробництві. Спеціальну сталеву форму заповнюють рідким металом під тиском до 300 МПа. Метал швидко твердне, утворюючи виливок. Після цього прес-форму розкривають і за допомогою спеціальних виштовхувачів вилучають виливок.

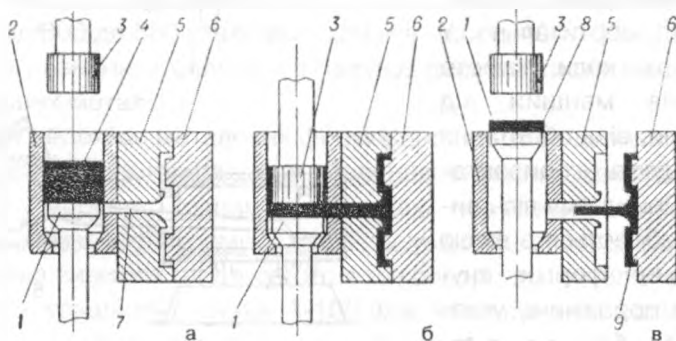


Рис. 6.17. Схема лиття під тиском: а - метал залито до камери пресування, б - пресування металу, в - видалення залишка металу і розкриття прес-форми; 1, 3 - поршень, 2 - камера пресування, 4 - метал, 5, 6 - половинки прес-форми, 7 - ливник, 8 - залишок металу, 9 - виливок

Лиття під тиском здійснюється на спеціальних машинах компресорної або поршневої дій. У першому випадку тиск на метал створюють стисненим повітрям, у другому - поршнем. Найбільшого поширення набули поршневі машини з холодною або гарячою камерами пресування, розташованими горизонтально або вертикально. Машини з гарячою камерою стискування розміщуються безпосередньо у розплаві й застосовуються для сплавів з низькою температурою плавлення (Zn, Sn, Pb). Машини з холодною камерою стискування використовують для одержання виливків з більш тугоплавких металів (на основі Cu, Al, Mg). Машини з гарячою камерою продуктивніші й економічніші (витрачають меншу кількість рідкого металу). Але їхнє використання обмежене сплавами з температурою плавлення, що не перевищує 500°C у зв'язку з швидким спрацюванням поршня. В таких машинах тиск у камері стискування досягає 20 МПа.

У машинах з холодною камерою стискування поршень контактує з розплавом протягом короткого проміжку часу, мало спрацьовується і тому тиск у них може бути значно вищим - до 100-300 МПа.

Лиття під тиском дозволяє одержувати 200-400 виливків за годину, без припусків на механічну обробку, з товщиною стінки до 0,5 мм, з отворами діаметром до 1 мм. Застосування тиску забезпечує якісне заповнення форми, відтворює тонкі деталі виливка, зменшує пористість і поліпшує чистоту поверхні. Метал характеризується дрібнозернистою структурою внаслідок швидкого охолодження його у формі, високою щільністю і підвищеною міцністю порівняно з литтям у земельні форми.

Різновидом лиття під тиском є лиття під низьким тиском (до 1 ат), що застосовується для виготовлення тонкостінних крупногабаритних виливків. Розплавлений в електричному тиглі метал надходить у форму з піщаним стрижнем під тиском інертного газу на дзеркало металу. Після тверднення виливка тиск газу знімають.

До недоліків лиття під тиском відносять: низьку стійкість форм при виготовленні виливків з тугоплавких сплавів; обме-

жена маса деталей; труднощі при одержанні виливків складної конфігурації; висока вартість та складність виготовлення прес-форм.

Лиття з використанням плавких моделей застосовують для виготовлення виливків складної конфігурації з будь-яких ливарних сплавів. За цією технологією можна одержувати виливки масою від 0,02 до 100 кг, з товщиною стінок до 0,5 мм і отворами діаметром до 2 мм.

Технологічний процес складається з таких операцій: виготовлення роз'ємних прес-форм з легкоплавкого сплаву; виготовлення у прес-формах нероз'ємних легкоплавких моделей (стеарин, парафін, віск тощо); виготовлення за плавкою моделлю нероз'ємної разової керамічної форми; виплавлення моделей з форми; прожарення форми; заповнення форми рідким металом, вибивка (вилучення) готових виливків.

Для виготовлення моделей використовують різні легкоплавкі сплави з температурою плавлення близько 55°C і високою рідкотекучістю (50 % парафіну і 50 % стеарину). Вищою міцністю володіють сплави на основі парафіну з добавками етилцелюлози, церезину, каніфолі тощо. У масовому виробництві моделі виготовляють, запресовуючи модельний матеріал у пастоподібному стані у сталеві прес-форми під тиском 3-5 ат. Далі дрібні моделі монтують у блоки з єдиною ливниковою системою. Це значно полегшує подальші операції виготовлення керамічних форм. Оболонка керамічної форми товщиною по 5-6 мм складається з 3-8 послідовно нанесених шарів. Кожен шар одержують зануренням плавкої моделі в рідку суспензію (~ 70 % гідролізованого розчину етилсилікату, що містить 40-50 % SiO_2 і 30 % кварцового пилу). Просушування здійснюють на повітрі протягом 2-4 годин.

Виплавлення моделей може проводитися різними способами. Серед них: у гарячих ваннах з водою; гарячим повітрям, паром; у висококиплячих (при 200-250 °C) рідинах (наприклад, полігліколях). Для запобігання деформації й руйнування оболонок моделі розміщують в опоках, засипають формівним мате-

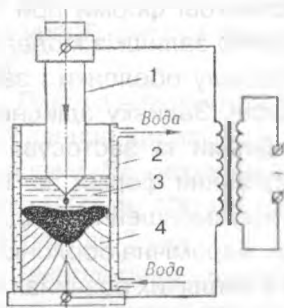
Металургія і ливарне виробництво

ріалом, ущільнюють. Прожарюють оболонкові форми при температурі 900-1000°C. Це сприяє видаленню залишків модельних матеріалів, газотворних речовин з матеріалу оболонки і забезпечує краще заповнення форми металом. Заливку здійснюють безпосередньо після прожарювання форми із застосуванням фільтрів. Підвищення температури нагрівання форми за 1200-1250°C у більшості випадків уможливорює зменшення усадкової пористості й підвищення якості виливків. Керамічна оболонка видаляється під час вибивання опоки або в киплячих розчинах лугів з подальшим промиванням виливків водою.

Лиття з використанням газифікованих моделей застосовують при виготовленні відповідальних виливків складної форми масою до 3,5 т з чавуну, сталі та кольорових сплавів. Для цього використовують моделі з вспіненого полістиролу, які не видаляються з форм. Під час заливки рідкого металу моделі газифікуються (розкладаються). Видаляються з форми лише продукти згоряння. Пенополістирол, що використовують для таких випалюваних моделей, у 50-100 разів легший від деревини, легко ріжеться гарячим дротом і дає змогу одержувати моделі дуже складної конфігурації шляхом склеювання окремих елементів моделі. За цією технологією можна отримувати точні виливки без формівних скосів і трудомістких операцій формування.

Електрошлакове лиття (ЕШЛ). При виготовленні виливків за цією технологією розплавлення металу, заповнення ним ливарної форми і тверднення виливка відбувається одночасно і безперервно. Ливарна форма при ЕШЛ виконує функції плавильного агрегату і формує виливок (рис. 6.18). Технологія забезпечує високу якість металу виливка, не потребує плавильного агрегату, розливального ковша, формівної суміші, ливникової системи, надливу, значно економить метал.

Процес відбувається під шаром рідкого шлаку, що є джерелом тепла, очищає метал від сірки і фосфору, захищає його від кисню і азоту з повітря. Шлак виконує також роль додаткової теплової зони металу, що кристалізується, сприяє усуненню усадкової раковини, забезпечує чисту поверхню металу виливка.



Кристалізація відбувається знизу догори за участю невеликих порцій рідкого металу. Це виключає ліквацію і осередкову рихлоту у виливку.

Рис. 6.18. Схема електрошлакового лиття (переплаву): 1 - електрод, що розплавляє, 2 - водоохолоджуваний кристалізатор, 3 - розплавлений шлак, 4 - виливок

19. За якими ознаками оцінюють якість виливків і контролюють наявність ливарних дефектів?

Контроль якості ливарних виробів здійснюють після вилучення виливків з форми і їх очищення. Візуально виявляють тріщини, раковини, недоливи, спаї, пригари тощо. На спеціальних зразках оцінюють механічні властивості, мікроструктуру та структуру злому, хімічний склад, відповідність виливків кресленням. Бракованими вважаються виливки з дефектами, зумовленими відповідними технічними вимогами, стандартами тощо. Ливарні дефекти поділяють на дві групи: невивправні та виправні. Виливки з невивправним браком ідуть на переплав.

Розглянемо основні види браку виливків.

Газові раковини - відкриті або закриті порожнини на поверхні або в об'ємі виливків з чистою і гладкою поверхнею. Причинами їх утворення є такі: підвищена газотворна здатність формівної суміші; недостатня її газопроникненість; погана вентиляція форми і стрижнів; недостатнє розкислення розплаву.

Земельні та шлакові раковини - відкриті або закриті порожнини у виливку, заповнені формівною сумішшю або шлаком. Мають шорстку поверхню. Утворюються в разі недостатньої міцності форми, неправильної конструкції ливникової системи,

недостатнього очищення металу від шлаку в ковші, порушення технології заливки.

Усадочні раковини, рихлоти і пористість - відкриті або закриті порожнини в тілі виливка (у потовщених місцях) з шорсткою поверхнею. Ці дефекти утворюються внаслідок неправильного надходження металу до ливарної форми (недостатнього живлення), розливки перегрітого металу, невідповідності хімічного складу металу режимам заливки і тверднення.

Недолив - неповне заповнення ливарної форми рідким металом. Утворюється внаслідок зниження температури розливки, недостатньої рідкотекучості, недостатнього перерізу живильників ливникової системи, неякісного монтування форми, що призводить до витікання металу крізь щілини роз'єму опоки.

Заливи - тонкі, різні за формою і розмірами виступи (не передбачені кресленнями виливка), що утворюються у площині роз'єму форми внаслідок надлишкового зазору між полуформами.

Спай - наскрізна або поверхнева щілина із заокругленими краями в тілі виливка. Утворюється внаслідок порушення суцільності струменя металу під час заливки, недостатньої рідкотекучості розплаву, неправильної конструкції ливникової системи.

Холодні тріщини - розриви в тілі виливка значної довжини і незначної ширини. Мають світлу неокислену поверхню, оскільки утворюються у межах низьких температур. Причина утворення холодних тріщин - високі внутрішні напруження, пов'язані з усадкою металу; пошкодження під час вибивання і очищення виливків.

Гарячі тріщини - розриви у тілі виливків, що мають незначну протяжність і значну ширину. Утворюються при високих температурах і тому мають темну окислену поверхню. Причинами їх утворення є такі: недостатня податливість форми і стрижнів та недостатня тривалість охолодження виливків у формі перед її вилученням.

Перекося - порушення конфігурації виробів (переміщення однієї частини відносно другої) внаслідок неправильного центрування опоки.

Різностінність - має місце в разі порушення правил розташування стрижнів або їх переміщення під час заливання ферми внаслідок недостатнього їх закріплення.

Короблення - це порушення розмірів і конфігурації литих виробів у результаті впливу внутрішніх напружень, що виникають внаслідок нерівномірного охолодження окремих частин виливків.

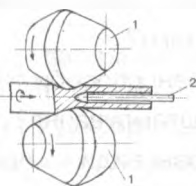
Під час контролю якості виливків визначають можливість виправлення дефектів литва. Для їх усунення широко застосовують заварювання і наплавлення - газове і електричне. Щоб уникнути утворення тріщин, виливки попередньо нагрівають до температури 350-600°C, а після виправлення дефекту повільно охолоджують. Дрібні тріщини і неглибокі раковини можуть бути виправлені металізацією - нанесенням шару металу. Пористість виливків усувають просочуванням під тиском рідким склом, розчином CuSO_4 , бакелітовим лаком тощо. Різні види мастик і замазок використовують для виправлення дефектів у невідповідальних виробих лише з декоративною метою.

РОЗДІЛ 7

Обробка металів ТИСКОМ

7

прокатування
волочіння
пресування
кування
штампування
нагрівальні
пристрої



Питання, висвітлені у розділі 7

1. Що таке обробка металів тиском?
2. Які фізико-механічні явища є основою обробки металів тиском? Які фактори впливають на пластичність металів?
3. Яке значення при обробці металу тиском має температурний інтервал і швидкість нагрівання?
4. Яке обладнання використовують для нагрівання металу перед обробкою тиском?
5. Що таке прокатування металу, чим характеризується цей процес?
6. Який інструмент використовують при прокатуванні?
7. Якими способами прокатують труби?
8. Що таке волочіння металу? Чим характеризується цей процес?
9. Що таке пресування металу? Які параметри характеризують цей процес?
10. Які основні методи і обладнання застосовують при пресуванні?
11. Які нові перспективні технологічні процеси використовують при пресуванні?
12. Що таке кування? Чим характеризується цей процес?
13. Які основні технологічні операції виконують при куванні?
14. Що таке гаряче об'ємне штампування, його основні характеристики?
15. Які основні способи та обладнання для гарячого об'ємного штампування?
16. Які основні види та особливості холодного об'ємного штампування?
17. Що таке листове штампування і чим характеризується цей процес?

Технологічний процес отримання фасонних деталей і заготовок у спосіб пластичного де-

формування металу в холодному або гарячому стані називають *обробкою металів тиском*. При цьому використовують одну з основних властивостей металів - здатність до пластичного деформування (пластичність). *Пластичністю* називають також здатність металів остаточно змінювати форму, деформуватись без руйнування під дією зовнішніх зусиль. 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: 1) прокатування; 2) волочіння; 3) пресування; 4) кування; 5) об'ємне штампування; 6) листове штампування. Застосування того чи іншого виду обробки тиском зумовлено можливостями формоутворення виробів і підвищення механічних властивостей металу внаслідок пластичного деформування, технологічною та економічною доцільністю.

Обробка тиском заснована на здатності металів (полікристалів) за певних умов до пластичної деформації.

П л а с т и ч н а

деформація металу здійснюється за рахунок зсувів між окремими кристалітами (зернами) та їх власної деформації. Розрізняють два механізми пластичної деформації: деформація ковзанням і 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-

1. Що таке обробка металів тиском?

2. Які фізико-механічні явища є основою обробки металів тиском? Які фактори впливають на пластичність металів?

механічних властивостей. Якщо ці зміни зберігаються після деформування, то її називають *холодною пластичною деформацією*, а явище зміни властивостей у сукупності - *наклепуванням (нагартуванням) або зміцненням*.

Під час нагрівання зміцненого таким чином 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). Це зумовлює різний рівень властивостей (*анізотропію*) вздовж і поперек виробу. Це враховують при виготовленні конкретних деталей, додержуючись двох правил: волокна металу повинні відповідати контуру деталі й не перерізатися; розтягуючі зусилля повинні діяти вздовж волокон.

У процесі обробки тиском (за пластичного деформування) відбувається не тільки зміна форми заготовки, але й зміна властивостей 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 і швидкості деформації. Відомо, що при підвищенні температури пластичність зростає, а міцність зменшується. Проте у вуглецевих сталях в інтервалі 100-400°C можливий зворотний процес. Цей інтервал температур називають *зоною крихкості або синьоломкості*. Із зростанням швидкості деформації пластичність знижується, хоча поріг текучості зростає. На технологічні властивості впливає також фазово-структурний стан оброблюваного металу. Так, механічне нагартування зменшує пластичність металу. Важливе значення при обробці тиском має схема прикладання зусиль і напруженого стану.

Нагрів металу перед деформуванням - важлива операція при обробці тиском, яка забезпечує необхідне підвищення пластичності та знижує опір деформації.

3. Яке значення при обробці металу тиском має температурний інтервал і швидкість нагрівання?

Температурний інтервал обробки характеризують верхня (T_g) і нижня (T_n) температури нагрівання. Вибір температурного інтервалу обробки здійснюють, виходячи з діаграми стану (рис. 7.1), оскільки температура плавлення сталі й чавуну ($T_{пл}$) залежить від вмісту в них вуглецю. T_g 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 обробляють в інтервалі 900-700°C, дюралюмінію - 470-400°C, титану - 1100-900°C.

Нагрівання металу слід здійснювати за режимами, що запобігають утворенню термічних тріщин. Так, заготовки вуглецевих сталей діаметром понад 150 мм і заготовки легированих 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

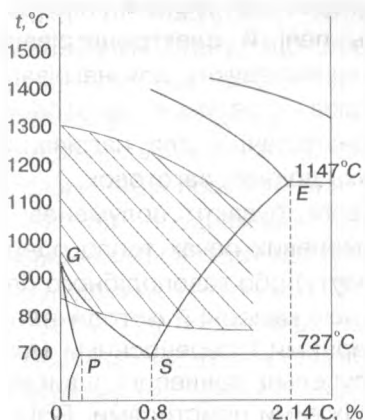


Рис. 7.1. Температурний інтервал нагрівання вуглецевої сталі для обробки тиском

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 полуменевого нагрівання складає 1,5-2,5 %, а при електронагріві - 0,4-0,7 %. При підвищених температурах відбувається також знеуглецювання поверхні сталі на 0,2-0,5 мм, іноді до 1,5-2,0 мм. Щоб запобігти 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, яка 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*, він не виправляється засобами термічної обробки і перепалений метал відправляють на переплавку.

4. Яке обладнання використовують для нагрівання металу перед обробкою тиском?

Для нагрівання заготовок перед обробкою тиском використовують печі й електронагрівачі. Печі використовують 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 значних розмірів зливків при прокатуванні й куванні.

Методичні печі характеризуються наявністю трьох зон з різними температурами і значною довжиною (8-22 м). Вони призначені для нагрівання заготовок значних розмірів під прокатування у серійному виробництві. Для нагрівання заготовок діаметром до 120 мм використовують печі з двома температурними зонами, їх називають напівметодичними.

В *електричних нагрівальних пристроях* використовують індукційний або електроконтактний нагрів. Перший засновується 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.

Прокатування - це обробка металу тиском, за якої заготовка обтискується валками прокатного стану, що обертаються. Метал деформують у гарячому або холодному стані,

5. Що таке прокатування металу, чим характеризується цей процес?

конфігурація і взаємне розташування валків (частіше двох) різні. Основні види прокатування: поздовжнє, поперечне і гвинтове (рис. 7.2). За поздовжнього прокатування (рис. 7.2,а) заготовка переміщується перпендикулярно до вісі валків, що обертаються у протилежних напрямках. За цією схемою виготовляють до 90 % прокату. Під час поперечного прокатування (рис. 7.2,б) валки з паралельними вісями обертаються в одному напрямку і обертають заготовку, яка, деформуючись, переміщується вздовж вісі валків. За такої схеми частіше використовують не два, а три валки. Поперечно-гвинтове прокатування (рис. 7.2,в) здійснюється за допомогою валків, що обертаються в одному напрямі й розташовані під кутом

один до одного. Таке розташування валків забезпечує виникнення вісьового зусилля, яке переміщує заготовку.

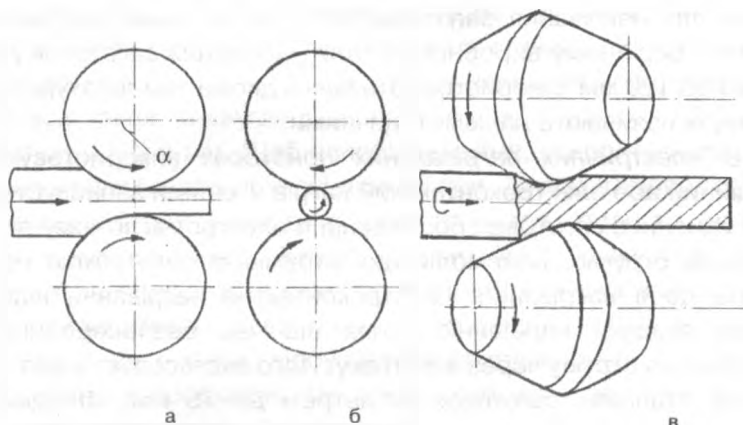


Рис. 7.2. Основні способи прокатування: а - поздовжнє, б - поперечне, в - гвинтове

Найбільш важливими параметрами процесу прокатування є одноосне обтискування (або ступінь деформації, %) і коефіцієнт витягування.

Відносне обтискування (ε) визначають за формулою:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0},$$

де h_0 і h_1 - товщина заготовки до і після обтискування відповідно.

Коефіцієнт витягування (μ) визначають за формулою:

$$\mu = \frac{L_1}{L_0},$$

де L_1 і L_0 - довжина заготовки після і до прокатування відповідно. Коефіцієнт витягування є основною характеристикою процесу прокатування. За один прохід заготовки він дорівнює 1,1-1,6 (іноді 2-2,5).

Обробка металів тиском

Величину деформації за один прохід обмежують умови захвату металу валками, тертя між валками і заготовкою. Умови захвату заготовки валками описує формула

$$f > \operatorname{tg} \alpha,$$

де: f - коефіцієнт тертя;

α - кут захвату.

Кут захвату α - центральний кут (див. рис. 7.2,а). Він спирається на дугу захвату, завдяки якій валок контактує із заготовкою. За гарячого прокатування $\alpha = 15-24^\circ$, а за холодного - $\alpha = 3-10^\circ$.

Швидкість виходу металу з валків переважає швидкість металу на вході, яка менша за швидкість обертання валків.

Основний інструмент прокатування - *валки*. Вони бувають гладкі, калібровані (рівчакові) та спеціальні. Гладкі валки діжкоподібної форми використовують 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) й 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 наближуючи її до форми готового виробу. Чистові калібри формують кінцевий профіль прокату з урахуванням коефіцієнта лінійного розширення і допусків щодо розмірів профілю. Сортамент одержаного прокату визначається сукупністю профілей і розмірів прокатуваного металу.

**6. Який
інструмент
використовують
при
прокатуванні?**

Профіль - це форма поперечного перерізу прокату. За сортаментом продукцію прокатного виробництва поділяють на чотири групи: сортовий прокат, листовий прокат, спеціальний і періодичний прокат.

Сортівний прокат поділяють на профілі загального призначення і профілі спеціального призначення. Профілі загального призначення - круг, полоса, квадрат, швелер, двутаврові балки, кутик тощо (рис. 7.3). Профілі спеціального призначення - фігурні (для автотракторного виробництва, суднобудування, транспортного машинобудування), рейки тощо.

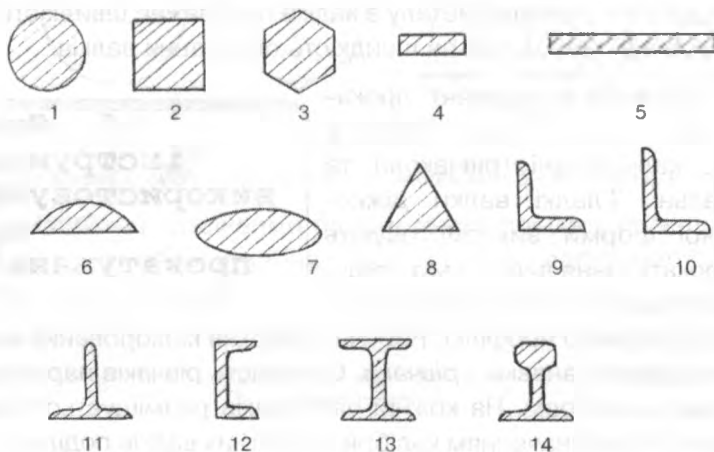


Рис. 7.3. Сортамент прокату: 1 - круг, 2 - квадрат, 3 - шестигранник, 4 - полоса, 5 - лист, 6 - сегментна сталь, 7 - овальна сталь, 8 - тригранна сталь, 9 - рівнобокий кутик, 10 - нерівнобокий кутик, 11 - таврова балка, 12 - швелер, 13 - двотаврова балка, 14 - рейка

Листову сталь поділяють на тонколистову (товщиною до 4 мм) і товстолстову. Деякі сорти листової сталі призначені для певних галузей промисловості: котельна, автотракторна, електротехнічна.

Трубний прокат поділяють на зварювальний і безшовний.

До спеціальних видів прокату відносять вагонні та зубчасті колеса, кульки, періодичний і гнутий профіль.

Заготовками для сортового прокату є *блуди* (у перерізі від 150x150 до 450x450 мм), а для листового - *сляби* (плити товщиною 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.

Прокатуванням одержують два види труб: безшовні та зварні. Заготовками для *безшовних труб* служать зливки і катані круглі профілі діаметром 120-320 мм. Виготовлення безшовних труб складається з трьох операцій: 1) прошивка отвору в заготовці й одержання товстостінної гільзи; 2) прокатування гільзи у трубу; 3) обробка готової труби.

Прошивку отвору здійснюють на прошивному стані, використовуючи схему поперечно-гвинтової прокатки (рис. 7.4). Радіальні розтягуючі напруження, що виникають у металі, зумовлюють легшу прошивку отвору оправкою (2) за допомогою бочкоподібних валків (1), осі яких розташовані під кутом 4-14°. Після прошивки і нагрівання гільза розкатується між двома валками на оправці (2) - дорні (рис. 7.5) 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 57 мм, а меншого діаметра - на періодичних (пілігримових) станах. Зменшення

7. Якими способами прокатують труби?

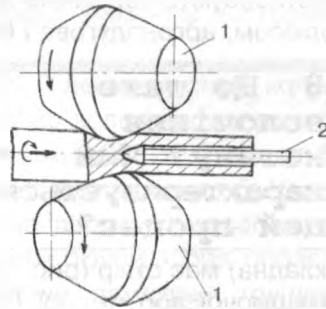


Рис. 7.4. Схема поперечно-гвинтової прокатування з прошивкою отвору

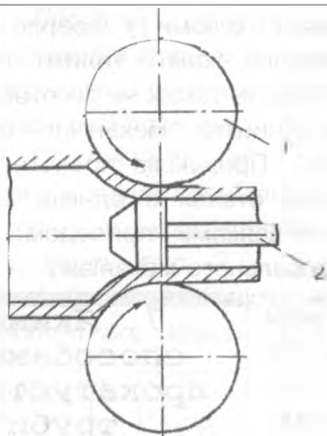


Рис. 7.5. Схема розкатування труб

ширшки окружності труби. Виготовлення зварної труби складається з таких операцій: формовка плоскої заготовки в трубу, зварювання труби, обробка і правка. Для виробництва труб застосовують контактне зварювання опором, електродугове під флюсом, аргондугове і безперервне пічне зварювання.

8. Що таке волочіння металу? Чим характеризується цей процес?

Волокна (або волока) має отвір (рис. 7.6,а), який складається з чотирьох зон: змащуючої або вхідної (1), робочого конуса або деформуючої зони (2), калібруючого поясу (3) і вихідного конуса (4). Кут робочого конуса залежить від здатності металу деформуватися і дорівнює 6-12°, ширина калібруючого поясу 2-10 мм.

Робочу частину матриці виготовляють з інструментальних сталей, твердих сплавів і технічних алмазів. Волочинням одержують вироби точних розмірів із заданою якістю поверхні.

діаметра здійснюють на безперервних редуційних 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 прошивочному.

Зварні труби, діаметр яких досягає 2500 мм, значно дешевші порівняно з безшовними, проте поступаються їм у міцності. Як заготовку для них використовують стрічку (штрипс) або лист за-

Волочіння - це процес протягування (часто в холодному стані) прокатаних або пресованих заготовок через отвір у матриці (волока, фільєра), що поступово звужується. Волока (ціла або

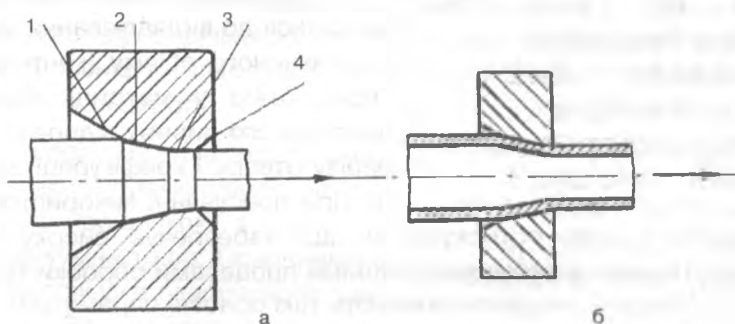


Рис. 7.6. Схема волочіння: а - прутка, б - труби

Основним параметром процесу волочіння є ступінь обтискування, який визначають так само, як і при прокатуванні, тільки замість товщин враховують площі поперечних перерізів заготовки. За одноразового волочіння обтискування складає 30-35 %. Волочіння здійснюють за кілька проходів із застосуванням змащувачів речовин - машинного масла, водяних емульсій, міднення заготовки. Передбачається також охолодження заготовок. Нагартування металу в процесі волочіння знімають наступним 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.

Виготовлення труб здійснюють за двома технологічними схемами: для зменшення лише діаметра труби - без оправки (рис. 7.6,б); для одночасного зменшення діаметра і товщини стінки - із застосуванням оправки.

Для волочіння використовують волочильні стани з прямолінійним рухом заготовки і з намотуванням металу на барабан. Швидкість волочіння тонкого дроту на барабанних станах досягає 40 м/с.

9. Що таке пресування металу? Які параметри характеризують цей процес?

Обробка металу пресуванням зводиться до видавлювання металу із замкнутого об'єму (контейнера) через отвір у матриці. Профіль пресованого виробу відповідає перерізу отвору і конфігурації матриці. При пресуванні використовують

багатостороннє обтискування, що забезпечує високу пластичність металу порівняно з іншими процесами обробки тиском

Пресування характеризують такі основні параметри.

1. Коефіцієнт витягування (λ)

$$\lambda = \frac{F_k}{F_m},$$

де: F_k - площа перерізу контейнера;

F_m - площа перерізу матриці.

2. Ступінь деформації (ϵ)

$$\epsilon = \frac{(F_k - F_m)}{F_k} 100 \%;$$

3. Швидкість витікання металу з отвору матриці (V_v)

$$V_v = \frac{F_k}{F_m} V_n = \lambda V_n,$$

де: V_n - швидкість пресування.

Процеси пресування характеризуються значною нерівномірністю деформації, особливо у разі застосування багатокавальних матриць. Основною умовою успішного здійснення процесу є правильний вибір температури і швидкості пресування з урахуванням властивостей матеріалу. При пресуванні широко застосовують змащування (графітову пасту) або оміднення заготовки. Пресуванням оброблюють пластичні й малопластичні матеріали. До недоліків цього процесу слід віднести значні відходи

металу та інтенсивне спрацювання інструменту. Пресуванням одержують прутки діаметром 5-250 мм, дрід 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. 7.7,а) напрямок виходу металу через отвір матриці (5) збігається з напрямком руху пуансона (1), тиск якого на заготовку передається через прес-шайбу (2). Ту частину заготовки, яка залишається в контейнері (4), називають прес-залишком (8-12 % від маси заготовки).

10. Які основні методи і обладнання застосовують при пресуванні?

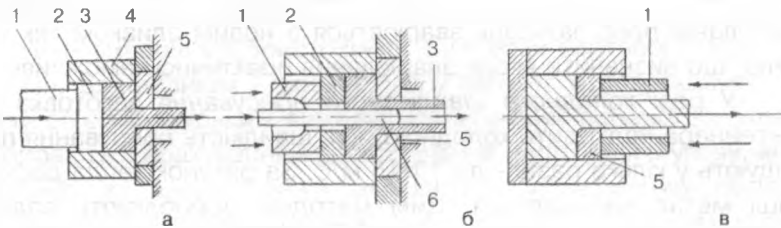


Рис. 7.7. Основні схеми пресування: а - пряме, б - з прошивкою, в - зворотне

При пресуванні труб заготовки спочатку прошивають голкою (6) (рис. 7.7,б), що проходить через пуансон (1). Під час подальшого переміщення пуансона і прес-шайби (2) метал видавлюється у вигляді труби (3) через кільцевий зазор між стінками отвору в матриці (5) і голкою.

За зворотного пресування (рис. 7.7,в) матрицю (5) встановлюють у кінці порожнистого пуансона (1) і метал пересувається у напрямку, протилежному руху пуансона. Прес-залишок при цьому методі дорівнює 6-10 % від маси заготовки. Швидкості пресування 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.

11. Які нові перспективні технологічні процеси використовують при пресуванні?

З нових методів знаходять поширення технології пресування без прес-залишку, холодно-швидкісне, пресування «з сорочкою» та 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. 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 з прес-залишком ідуть 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

Обробка металів тиском

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, товщина стінки яких - 0,2-0,3 мм.

Кування - це процес деформування нагрітої металевої заготовки між бойками молота або преса. Пластичне деформування при цьому здійснюється на

12. Що таке кування? Чим характеризується цей процес?

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 врахуванням забезпечення необхідного укову, який показує в скільки разів змінюється поперечний переріз заготовки у процесі кування. Чим більший уков, тим краще прокований метал, 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 повинен бути не менше 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 інструменту.

13. Які основні технологічні операції виконують при куванні?

Виконуючи в певній послідовності прості операції кування, одержують вироби складної конфігурації. Основними операціями процесу кування є осадка, висадка, прошивка, протяжка, розгонка, рубка, скручування, передача (рис. 7.8).

Осадка - це збільшення поперечного перерізу вихідної заготовки за рахунок зменшення її висоти. Для правильного осаджування металу висота вихідної циліндричної заготовки повинна не перевищувати трьох діаметрів, торці повинні бути рівними і паралельними (рис. 7.8,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 плитки (рис. 7.8,б). Так виготовляють поковки болтів, деталей з буртами, фланцями тощо.

Прошивка - одержання в заготовці наскрізного отвору або заглиблення (рис. 7.8,в). Її також використовують для видалення неякісної серцевини зливка.

Протягуванням досягають збільшення довжини заготовки за рахунок зменшення її поперечного перерізу (рис. 7.8,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, важілі та ін.

Розгонка - це збільшення ширини частини заготовки за рахунок зменшення її товщини (рис. 7.8,д).

Рубка - відділення однієї частини заготовки від іншої (рис. 7.8,е). Інструментом для цього служать прямі й фігурні сокири та зубила. Рубку часто використовують для видалення надлишків металу, а також з метою створення уступів, заплечиків тощо.

Згинання і скручування металу здійснюють з використанням різних пристроїв: підкладок, ключів, воротків, лебідок.

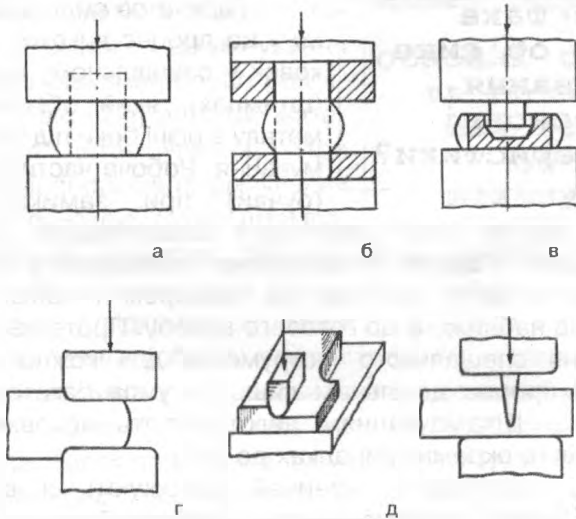


Рис. 7.8. Схеми деяких операцій кування

Передача металу зводиться до переміщення однієї частини заготовки відносно іншої, 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 долі секунди зі швидкістю деформування до 6,5 м/с. Деформування металу забезпечує енергія, накопичена падаючими частинами молота. Пневматичні молоти мають масу падаючих частин 50-1000 кг, пароповітряні - 1000-8000 кг.

Гідравлічні преси відрізняються від молотів тим, що здійснюють статичний вплив на метал заготовки. Тривалість деформації при цьому досягає десятків секунд, а швидкість деформації - 2-3 м/хв. Максимальні зусилля гідравлічних пресів у інтервалі 5-150 МН. Преси використовують для виготовлення поковок значних розмірів, а також для кування малопластичних високолегованих сталей і сплавів кольорових металів.

14. Що таке гаряче об'ємне штампування, його основні характеристики?

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 (ручай) при замиканні його

складових частин після закінчення штампування відповідає формі поковки. Гаряче штампування, порівняно з куванням, дозволяє виготовити поковку за розміром і конфігурацією, максимально наближену 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 наближають до форми виробу попереднім деформуванням у так званих заготівельних ручаях штампів, у ковальських вальцях тощо.

Розробка технології штампування починається зі створення штампа відповідно до креслення готової деталі та правильного вибору площин роз'ємів на ньому, допусків, ухилів, радіусів заокруглення, розмірів. Розміри заготовки визначають, виходячи з розмірів виробу і способу його штампування. Після здійснення самого процесу штампування поковку піддають завершальним операціям обробки для забезпечення точності розмірів, якості поверхні та властивостей виробу. До таких 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. Очищення від жаровини проводять галтувальними барабанами, дробометальними установками, а також протравлюванням у 15-18 %-ному розчині H_2SO_4 при температурі до 60°C. Калібровку виробів виконують 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,

15. Які основні способи та обладнання для гарячого об'ємного штампування?

який визначає характер деформування металу. Розрізняють штампування у відкритих і закритих штампах (рис. 7.9). Для штампування у відкритих штампах (рис. 7.9,а) характерно утворення заусениць (облою) у проміжках між частинами штампа, який закриває вихід з порожнини штампа основної маси металу, а в кінцевий момент деформування витісняє надлишок металу. У закритих штампах порожнина під час деформування залишається закритою (рис. 7.9,б). Перевагою цього способу штампування є зменшення відходів металу, а недоліком - необхідність точного додержання рівності об'ємів заготовки і поковки.

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 з цих машин має свої особливості, переваги і недосконалості. 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.

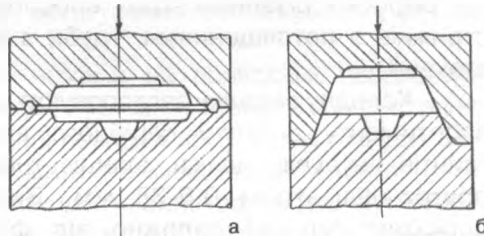


Рис. 7.9. Схеми штампування у відкритих (а) і закритих (б) штампах

16. Які основні види та особливості холодного об'ємного штампування?

Штампування без нагрівання заготовок називають *холодним*. Воно дозволяє майже повністю вилучати обробку поковок різанням, забезпечуючи порівняно з останнім, зменшення трудових витрат на 30-80 % і підвищення коефіцієнта використання металу до 50 %. Проте застосування її досить обмежене у зв'язку зі значними зусиллями при деформації та низькою стійкістю інструмента.

Основними видами холодної об'ємної штамповки є видавлювання, висадка, об'ємне формування і калібрування. Холодне видавлювання аналогічне пресуванню, а всі інші види холодної обробки аналогічні відповідним процесам гарячого штампування.

При холодному *видавлюванні* на відміну від пресування заготовкою є не зливоч, а пруточ, і продуктом обробки є не протягувальний профіль, 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, шпичів тощо. Заготовкою є дріт або пруточ 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 не повинно перевищувати 2,5 при висадці за 1 удар і 8 - при висадці за 3 удари.

Холодне *формування* використовують для виготовлення складних за формою деталей з площею горизонтальної проекції до 5000 мм² і висотою до 25 мм. Її здійснюють у відкритих і закритих штампах. Спеціальна заготовка з сортового або листового прокату, а також виготовлена гарячою штамповкою або точним литтям береться за вихідну. Холодне формування в закритих штампах застосовують здебільшого для виготовлення деталей зі сплавів кольорових металів. При формуванні за кілька пе-

обробка металів тиском

переходів для підвищення пластичності проводять операцію проміжного відпалювання. Холодне формування і видавлювання здійснюють з використанням змащування.

Холодне калібрування (чеканення) 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 штампів на пресах чи без них (безпресове штампування). Таке штампування можна здійснювати з нагріванням, проте найпоширенішим є холодне штампування смуг товщиною 0,1-0,5 мм. Нагрівання застосовують при товщині листа більше 5 мм. Продуктивність листового штампування досить висока - до 40 тисяч деталей за зміну.

17. Що таке листове штампування і чим характеризується цей процес?

Технологічні операції листового штампування поділяють на дві групи: роздільні (відрізання, вирубка, вирізування, пробивання) і формозмінні (згинання, витягування, обтискування, формоутворення).

Відрізання здійснюють ножами на приводних паралельних гільотинах або дискових ножицях, а також на пресах з використанням штампів. Для одержання якісної поверхні зрізу зазор між ріжучими кромками ножів повинен становити 3-5 % від товщини листа.

Вирубка, вирізування і пробивання за своєю сутністю є різанням по замкненому контуру і відрізняються лише за призначенням. Штampi для цих операцій можуть бути простої дії (для виконання однієї операції) та багатоопераційні.

Під час *вигину* в кожному перерізі одночасно діють стискуючі й розтягуючі напруження. Внаслідок цього пластична деформація може бути досить великою. Тому при згинанні слід враховувати кут, на який відпружнює виріб.

Витягування - це одержання порожнистої деталі замкненого контура з плоскої листової заготовки. Цим способом можна виготовляти деталі з листа товщиною 0,02-30 мм і розміром від десятих долей міліметра до кількох метрів. Основним пара-

метром, 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 з утоненням 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. Це обтискування, рельєфне формування, розбортовка тощо.

У малосерійному виробництві застосування складних за конструкцією штампів недоцільне. Тому для одержання порожнистих виробів використовують спрощені способи штампування: вибуховою хвилею, гумою або рідиною, електрогідравлічне, магнітно-імпульсне, ротаційне видавлювання на спеціальних верстатах або установках.

Штамування 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, яка викликає деформацію заготовки. Швидкість деформування при цьому досягає 300 м/с. Для виробництва одиничних виробів матриця може виготовлятися з чапуну, бетону, дерева, гіпсу, картону, льоду.

Електрогідравлічне штампування подібне штампуванню 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 для обтискування трубчастих заготовок, штампування плоских листових заготовок з електропровідних металів, а також для виконання операцій запресовки, з'єднання труб, виготовлення балонів тощо.

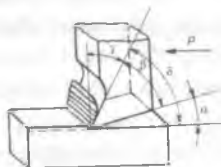
Ротаційне видавлювання дає можливість одержувати, як і при витягуванні, порожнисті деталі типу тіл обертання з листа на універсальних токарно-гвинторізних і карусельних верстатах.

РОЗДІЛ 8

Обробка металів різнанням

8

заготовка
координатна площина
різальна частина
кути різця
режими різання
стійкість інструменту
верстат
свердло
фреза
шліфування



Питання, висвітлені у розділі 8

1. Що таке обробка металів різанням?
2. Які основні поняття характеризують процес різання і різальний інструмент?
3. Які основні параметри характеризують геометрію різця?
4. Які основні параметри характеризують процес різання?
5. Які параметри визначають якість оброблювальної поверхні?
6. У чому фізична сутність процесу різання? Які види стружки утворюються при різанні?
7. Які основні фізичні явища супроводжують процес різання?
8. Яка роль мастильно-охолоджувальних речовин при різанні?
9. Які сили діють у процесі різання?
10. Що таке стійкість інструмента та які види його спрацювання існують?
11. Які матеріали використовують для виготовлення різального інструменту?
12. За якими ознаками класифікують металорізальні верстати?
13. Які роботи виконують на верстатах токарної групи?
14. За якими ознаками розрізняють токарні різці та для виконання яких робіт їх використовують?
15. Які види робіт виконуються на свердлильних і розточувальних верстатах? Який інструмент застосовують для цього?
16. З яких елементів складається спіральне свердло? Як визначають режим різання і розмір шару, що зрізається?
17. Які види робіт виконують на фрезерних верстатах?
18. За якими ознаками класифікують фрези? Які особливості їх застосування?
19. Які роботи виконують і який інструмент застосовують на шліфувальних полірувальних і доводочних верстатах?
20. Які основні типи верстатів і схеми шліфування існують? Які елементи різання враховують при шліфуванні?
21. Які основні параметри характеризують абразивний інструмент?

Обробка металів різанням - це процес зняття різальним інструментом шару металу заготовки (стружки) з метою надання

1. Що таке обробка металів різанням?

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, у свою чергу, є головний рух і рух подачі. Головним рухом здійснюють процес зняття стружки, а рухом подачі - процес різання, що почався (поширюють на необроблені ділянки поверхні заготовки). Так, наприклад, під час свердлення головним рухом є обертання свердла, а його переміщення вздовж осі або в бік є рухом 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 може надаватися 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 рухом - різання переривчасте.

До основних понять щодо процесу різання відносять: поверхні заготовки, координатні площини, елементи різальної частини і геометрію різця (кути, режими різання і розміри заданого шару металу).

2. Які основні поняття характеризують процес різання і різальний інструмент?

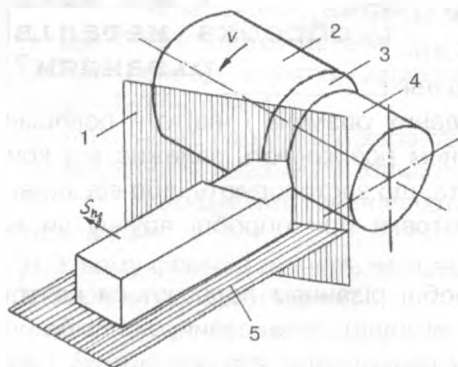


Рис. 8.1. Координатні площини і поверхні оброблюваної заготовки

Оброблювана поверхня (рис. 8.1) - це поверхня заготовки, з якої знімають стружку (2); оброблена поверхня (4) - цю, з якої знято стружку, поверхня різання (3) утворюється головним різальним лезом різця. Координатними площинами називають площину різання (1), дотичну до поверхні різання (3), що проходить через головне різальне лезо різця, і основну площину (5), паралельну напрямку поздовжньої ($S_{\text{пз}}$) і поперечної подач.

Основні елементи різального інструмента (різця) розглянемо на прикладі токарного різця (рис. 8.2). Він складається з різальної частини (I-головки) і стрижня (II), що існує для кріплення його в держак верстата.

Розрізняють такі елементи різальної частини різця: передня поверхня (6), по якій збігає стружка; вершина різця (5) - точка перетину різальних лез; головна задня поверхня (2), обернена до поверхні різання; допоміжна задня поверхня (3), повернена до обробленої поверхні заготовки; головне лезо різання (1), утворене перетином передньої (6) та головної задньої поверхонь (2), яке здійснює основну роботу різання; допоміжне різальне лезо (4), утворене перетином передньої і допоміжної задньої поверхонь.

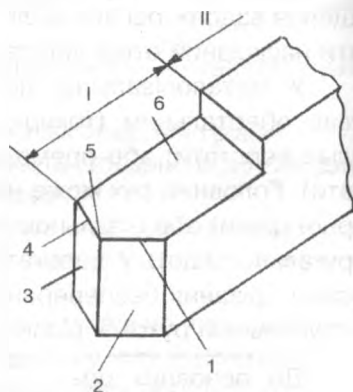


Рис. 8.2. Частини і елементи токарного прямого проходного різця

Форма різця, головні кути визначають його геометричну форму і значно впливають на процес різання. Головні кути різця розглядають у головній площині перерізу A (рис. 8.3,а). На рис.

8.3,б ця площина показана для токарного різця, а на рис. 8.4, що ілюструє модифікаційну схему стругання, ця площина збігається

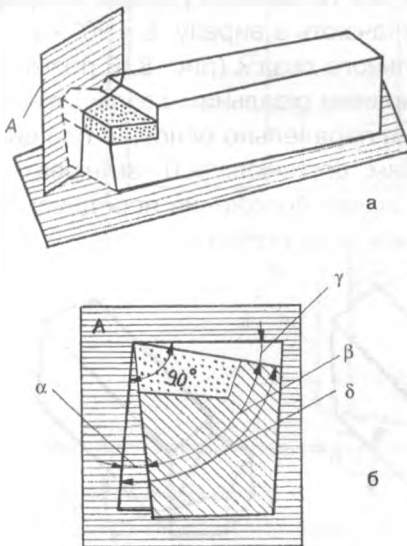


Рис. 8.3. Головні кути токарного різця

Параметри різання залежать від головного заднього кута (α), переднього кута (γ), головного кута у плані (ϕ) тощо.

Головним заднім кутом (α) називають кут між головною задньою поверхнею різця і площиною різання. Він призначений для зменшення тертя між головною задньою повер-

3. Які основні параметри характеризують геометрію різця?

з площиною креслення. Різальна частина різця у вигляді клину під дією сили P (рис. 8.4) врізується в оброблюваний матеріал. Чим гостріший клин (менший 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 з виразу $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$, знаючи інші кути заточування різального інструмента.

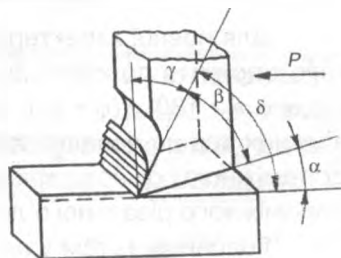


Рис. 8.4. Головні кути стругального різця

хнею різця і поверхнею різання заготовки. Кут α обирають у межах 6-12°.

Головним переднім кутом (γ) називають кут між передньою поверхнею різця і площиною, перпендикулярною до площини різання. Від нього залежить ступінь деформації зрізуваного шару, і 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, його визначають з виразу: $\delta = 90^\circ - \gamma$.

Кут нахилу головного різального леза λ (рис. 8.5) розміщується у площині різання між головним різальним лезом і лінією, проведеною через вершину різця паралельно основній площині. Він може бути додатнім, від'ємним, дорівнювати 0 і змінюватися у межах від +4° до -4°. Кут λ визначає положення передньої поверхні різця і впливає на напрямок руху стружки.

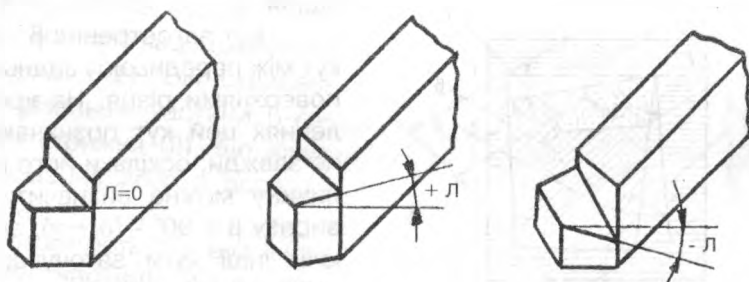


Рис. 8.5. Кут нахилу головного різального леза токарного різця

Для повної характеристики геометрії різця використовують також поняття допоміжних кутів різця α_1 , γ_1 , ϕ_1 і кут при вершині різця ϵ . $\epsilon = 180^\circ - (\phi + \phi_1)$, тобто дорівнює куту між проекціями різальних лез на основну площину (рис. 8.6). α_1 і γ_1 вимірюють за допоміжною січною площиною, перпендикулярною проекції допоміжного різального леза на основну площину.

Головним кутом у плані ϕ називають кут між проекцією головного різального леза на основну площину і напрямком поздов-

Обробка металів різанням

жньої подачі $S_{пз}$. Його обирають у межах $30-90^\circ$ (найчастіше $\varphi = 45^\circ$). Він впливає на форму перерізу зрізаного шару, чистоту обробки і спрацювання інструмента.

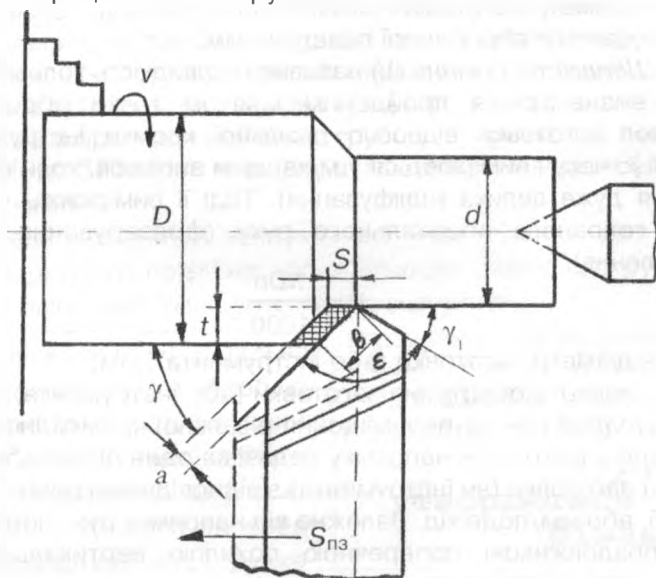


Рис. 8.6. Елементи різання і геометрія зрізувального шару металу

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.

До основних параметрів процесу різання відносять глибину і швидкість різання, подачу, ширину і товщину зрізаного шару металу та номінальну площу його перерізу.

4. Які основні параметри характеризують процес різання?

Глибиною різання (t) називають товщину шару металу, який зрізається за один прохід різального інструмента. При поздовжньому точінні циліндричної поверхні (див. рис. 8.6):

$$t = \frac{D-d}{2} \text{ мм,}$$

де: D - діаметр заготовки, мм;

d - діаметр обробленої поверхні, мм.

Швидкістю різання (V) називають швидкість головного руху. Вона визначається пройденим шляхом точки оброблюваної поверхні заготовки відносно різальної кромки інструмента за одиницю часу і вимірюється у м/хв, крім випадків, коли швидкість різання дуже велика (шліфування). Тоді її вимірюють у м/с. За умов головного обертального руху (фрезерування, точіння, свердлення):

$$V = \frac{\pi D n}{1000}$$

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 або подвійний хід заготовки (чи інструмента) з відповідними розмірностями мм/об. або мм/подв.хід. Залежно від напрямку руху подача може бути поздовжньою, поперечною, похилою, вертикальною, тангенційною, круговою тощо.

Ширина шару різання (b) - це відстань між двома послідовними положеннями різальної кромки за час повного оберт заготовки, заміряна в напрямку нормальному до товщини шару зрізаного металу (a), де $a = s \sin \phi$.

Номінальну площу поперечного перерізу зрізуваного шару (в мм²) визначають добутком подачі на глибину різання або товщини зрізуваного шару на його ширину ($f = st = ab$).

5. Які параметри визначають якість оброблюваної поверхні?

Якість оброблюваної 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,

Обробка металів різанням

корозійну стійкість тощо. *Шорсткістю* називають сукупність нерівностей поверхні деталі на певний (базовий) її довжині. Для кількісної оцінки шорсткості існують шість параметрів: середнє арифметичне відхилення профілю (R_a); висота нерівностей профілю за десятима точками (R_z); найбільша висота нерівностей (R_{max}); середній крок нерівностей; середній крок нерівностей за їх вершинами і відносна довжина профілю. З чотирнадцяти існуючих класів шорсткості найбільш грубою і шорсткою є поверхня 1 класу (R_z до 320 мкм), а найбільш гладкою - поверхня 14 класу ($R_z < 0,1$ мкм).

Рівень шорсткості залежить від умов різання. Для зменшення шорсткості потрібно або збільшити радіус заокруглення вершини різця, або зменшити кути різця в плані.

При вдавненні різальної частини інструмента в оброблюваний матеріал перед ним виникає (під дією зовнішньої сили) пружно- і пластично деформований об'єм. Це зона випереджуючої деформації або *стружко-*

6.У чому фізична сутність процесу різання? Які види стружки утворюються при різанні?

утворення, що охоплює як зрізаний шар металу, так і його частину під оброблюваною поверхнею. Процес утворення елемента стружки можна поділити на три етапи. На першому відбувається пружне і пластичне деформування і майбутній елемент стружки зміцнюється в зоні стружкоутворення. На другому етапі елемент стружки зміщується по площині зсуву. Це відбувається в той момент, 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. 8.7).

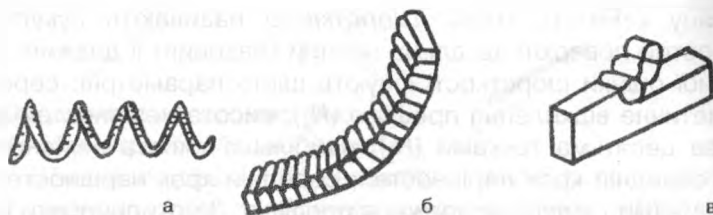


Рис. 8.7. Види стружки різання: а - зливна, б - суставчаста, в - стружка надлому

Зливна стружка (рис. 8.7,а) має вигляд суцільної стрічки з гладкою внутрішньою (біля різця) і шорсткою зовнішньою поверхнями. Границі між елементами стружки не спостерігаються.

Суставчаста стружка відколу (рис. 8.7,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. 8.7,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.

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).

7. Які основні фізичні явища супроводжують процес різання?

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, які

Обробка металів різанням

викликає сила вдавлювання різця в метал. Максимальне пластичне деформування в зоні утворення стружки викликає зсувні деформації в зрізаному шарі металу. Це призводить 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 зрізаного 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.

Утворення наросту - це явище формування щільного утворення частинок металу, міцно закріплених на передній поверхні різця. Воно спостерігається 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 сильно деформований, твердість його значно (іноді у 2-3 рази) переважає твердість оброблюваного металу. Нарост під час процесу різання періодично руйнується, виноситься разом зі стружкою і утворюється знову. Наріст захищає вершину різця і різальну кромку від завчасного спрацювання, покращує тепловідбір, проте якість і точність виготовлення поверхні погіршується. Тому чистову обробку виконують при підвищених швидкостях різання із застосуванням мастильно-охолоджувальних рідин, ретельно доведеними різцями зі значними передніми кутами.

Поверхневий шар оброблюваної деталі в процесі різання деформується на глибину до міліметра залежно від різних факторів. Твердість металу поверхні може підвищуватися у 2-3 рази порівняно з основним металом. Поверхнєве зміцнення мо-

же бути корисним, підвищуючи стійкість деталі проти спрацювання і втомну міцність виробу, але може бути 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. Невелика частина теплоти потрапляє до навколишнього середовища як випромінювання і (у разі застосування мастильно-охолоджувальних речовин) у спосіб конвекції. На температуру нагрівання різального інструмента найбільше впливає швидкість різання, менше - подача, ще менше - глибина різання. Обробка різанням повинна здійснюватися без перегріву різального інструмента. Для інструменту з вуглецевої сталі вона не повинна перевищувати 200-250°C, швидкорізальної - 550-600°C, інструменту з твердого сплаву - 800-1000°C, металокераміки - 1000-1200°C.

Теплові процеси при різанні можуть істотно впливати на якість поверхні та розміри виробів, призвести до фазових перетворень, змінювати властивості матеріалу.

8. Яка роль мастильно-охолоджувальних речовин при різанні?

Мастильно-охолоджувальні речовини застосовують здебільшого з метою зниження температури. Проте ці речовини не лише охолоджують, а й зменшують сили зовнішнього тертя і сприяють ви-

даленню з зони різання стружки та продуктів зношування. Для цього використовують переважно рідини, до яких додають тверді речовини (графіт, бітум, мило, парафін, дисульфід молібдену, соду та ін.). Дуже рідко для цього використовують гази.

Найкращу охолоджувальну дію мають водні розчини з домішками 1-5 %-ої кальцинованої соди, бури, нітрату натрію тощо. Застосовують також масляні емульсії - розчини у воді 1,5-10 %-х

Обробка металів різанням

емульсолів (мінеральних масел з різними домішками) та масляні рідини - мінеральні масла з домішками до 30 % рослинних масел. Охолоджувальна дія масляних рідин досить низька.

Зрізуючи стружку, різець переборює опір оброблюваного матеріалу і сили тертя стружки. Рівнодіючу сил, що діють на різець, називають *рівнодіючою силою різання* (P). У розрахунках же, як правило, використовують її складові P_x , P_y , P_z , значення яких одержані розкладанням сили P за трьома взаємно перпендикулярними вісями (рис. 8.8).

9. Які сили діють у процесі різання?

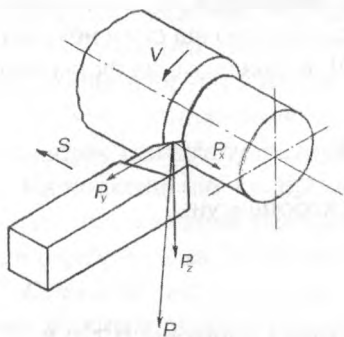


Рис. 8.8. Схема сил різання при точінні

У площині різання у напрямку головного руху діє сила P_z , яку називають *дотичною* або *вертикальною складовою сили різання*. Сила P_y діє перпендикулярно осі оброблюваної заготовки і називається *радіальною складовою*. Силу P_x , яка діє вздовж вісі заготовки паралельно напрямку поздовжньої подачі, називають *віською складовою сили різання* або *силою подачі*.

За силою P_z визначають момент обертання на шпинделі верстата, потужність різання, а також здійснюють динамічні розрахунки коробки швидкостей. Тому її іноді називають *головною складовою сили різання* або просто *силою різання*.

Момент обертання на шпинделі верстата визначають за формулою:

$$M_{об} = \frac{(P_z D)}{2000}, \text{ Н м}$$

де: D - діаметр оброблюваної заготовки, мм.

Силу P_z при точінні визначають за емпіричною формулою:

$$P_z = C_{pz} \cdot t^{X_p} \cdot s^{Y_p} \cdot K_{pz} \cdot H,$$

де: C_{pz} , X_p , Y_p , K_{pz} - поправочні коефіцієнти для різних матеріалів і конкретних умов обробки (беруть з довідників).

Сила P_y намагається відштовхнути різець від заготовки і деформувати її. Вона входить до розрахунків міцності станини і супорта, а сила P_x - до розрахунків механізму подачі верстата. Значення P_x і P_y можуть бути визначені з емпіричних формул, проте у практиці різання їх визначають як частини P_z .

При розрахунках ефективної потужності N_e , затраченої на різання при поздовжньому точінні, складовою від сили нехтують (1-2 % всієї потужності) й потужність N_e визначають за формулою:

$$N_e = \frac{(P_z \cdot V)}{60 \cdot 10^3}, \text{ кВт}$$

Потужність, що витрачає електродвигун:

$$N_{ед} = \frac{N_e}{\eta},$$

де: η - коефіцієнт корисної дії верстата і дорівнює 0,7-0,8.

Складові сили різання істотно впливають на спрацювання і стійкість інструмента.

10. Що таке стійкість інструмента та які види його спрацювання існують?

Спрацювання різальної частини інструмента характеризує його здатність протидіяти мікроскопічному руйнуванню на поверхнях його контакту з заготовкою та стружкою. Розрізняють кілька видів спрацювання інструмента.

Абразивне спрацювання - це механічне зношування, дряпання інструмента твердими частинками оброблюваного матеріалу, які, подекуди, можуть мати твердість, сумірну твердості матеріалу інструмента. Цей вид спрацювання переважає за від-

Обробка металів різанням

носно невеликих швидкостей різання і під час обробки крихких матеріалів (зазвичай по задній поверхні інструмента).

Адгезійне спрацювання - 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°C.

Окисне спрацювання має місце при температурах різання 700-800°C, коли кисень повітря вступає в хімічну реакцію з матеріалом інструмента (кобальтовою складовою твердого сплаву, карбідами вольфраму і титану).

Крихке спрацювання - це процес відколу (викришування) макрочасток матеріалу інструмента.

На практиці під час процесів різання спостерігається одночасна дія різних видів спрацювання, що визначає кінцеву стійкість інструмента за даних умов різання.

Стійкість 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. Так, 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_s). На практиці критерієм затуплення вважають певний рівень спрацювання задньої поверхні інструмента, оскільки це зумовлює збільшення сил різання, тертя, підвищення температури, шорсткості оброблюваної деталі. Величина h_s залежить

від матеріалу деталі та інструмента, режиму різання, чистоти і точності обробки. Так, для токарних різців із твердосплавними пластинами за чорнової обробки сталі $h_z=0,8-1$ мм, чавуну $h_z=1,4-1,7$ мм. Для чистової обробки встановлюють *технологічні критерії затуплення* - такий рівень спрацювання задньої поверхні інструмента, перевищення якого призводить до невідповідності виробу технічним вимогам.

11. Які матеріали використовують для виготовлення різального інструменту?

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 при високих температурах (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°C) їх застосування обмежене. З вуглецевих сталей виготовляють інструмент для невеликих (до 15-18 м/хв) швидкостей різання (плашки, розвертки, ножовочні полотна тощо).

Леговані інструментальні сталі забезпечують вищу твердість і дещо вищу теплостійкість (250-300°C) інструменту. Легування сталі такими елементами, як Cr, V, Mo, W тощо, підвищує їхні міцність, прогартовуванність, зносостійкість, теплостійкість.

Обробка металів різанням

Інструменти з легованої сталі мають кращі різальні властивості, менш схильні до деформації й тріщиноутворення під час гартування. Оскільки інструменти з легованих сталей мають невисоку теплостійкість, 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 (до 19 %), хрому (до 4,5 %), молібдену (до 5 %), а також ванадій, кобальт, інші домішки. Після гартування і відпуску твердість швидкорізальної сталі дорівнює 62-65 HRC, теплостійкість - 650°C, тобто ці сталі володіють високою червонотривкістю. З метою 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. Кобальтові сталі P9K6, P9KF, PCK5F2 використовують для 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 - вольфраммолібденові (P9M4, P6M3, P6M5).

Тверді металокерамічні сплави мають високу твердість, стійкість проти спрацювання, міцність, теплостійкість до 900-1000°C. Їх використовують для високопродуктивної обробки зі швидкістю різання до 800 м/хв. Тверді сплави виготовляють спіканням при температурах 1500-1900°C з дисперсних порошків карбідів (WC, TiC, TaC) і порошку кобальту. Тверді сплави поділяють на 3 групи: вольфрамові (BK), титановольфрамові (TK) і титанотанталовольфрамові (ТТК). Додаткові літери В і М у кінці марки сплаву вказують на дисперсність вихідного порошку 3-5 мкм і 0,5-1,5 мкм відповідно. Зі сплавів групи BK 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. З цією метою використовують більш дешеві безвольфрамові тверді сплави (БТТС) на основі карбідів і карбідонітридів титану з нікель-молібденовою зв'язуючою фазою.

Мінералокерамічні матеріали забезпечують інструменту високі 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. Ці пластини закріплюють на держаках різального інструмента. Мінералокераміку використовують для чистової швидкісної обробки за умов відсутності ударних і згинаючих напружень. Кращою вітчизняною маркою мінералокераміки вважають ЦМ-332.

12. За якими ознаками класифікують металорізальні верстати?

За рівнем спеціалізації металорізальні верстати поділяють на універсальні, спеціалізовані та 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 одного типорозміру деталей.

За технологічними ознаками (залежно від характеру обробки) верстати поділяють на такі групи: 1 - токарні; 2 - свердлильні й розточувальні; 3 - шліфувальні, полірувальні, доводочні; 4 - для електрофізичної й електрохімічної обробки; 5 - зубо- і різьбообробні; 6 - фрезерні; 7 - стругальні, довбальні, протяжні; 8 - розрізні; 9 - різні. Верстати кожної з цих груп поділяються на типи за такими основними ознаками: технологічне призначення (круглошліфувальні, плоскошліфувальні); конструктивні особливості (універсально-фрезерні, поздовжньо-фрезерні); розташу-

Обробка металів різанням

вання робочих деталей у просторі (вертикально-свердлильні, горизонтально-свердлильні); кількість робочих деталей верстата (одношпindelні, багатшпindelні); ступінь автоматизації (з ручним керуванням, напівавтомати, автомати). У промисловості найпоширеніші токарні, свердлильні, фрезерні та шліфувальні верстати.

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 ним 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. 8.1 і 8.6.

Токарні різці класифікують за різними ознаками.

За матеріалом різальної частини розрізняють різці сталеві, твердосплавні і мінералокерамічні. За конструкцією різці поділяють на суцільні та складані. Залежно від розташування головної різальної кромки розрізняють різці правосторонні й лівосторонні. Під час різання правостороннім різцем (рис. 8.9,а,б,е,з,ж) стружка зрізується з

13. Які роботи виконують на верстатах токарної групи?

14. За якими ознаками розрізняють токарні різці та для виконання яких робіт їх використовують?

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 вісі головки різця відносно вісі його тіла (в плані) розрізняють різці *прямі* (рис. 8.9,а-е,ж-і) і *відігнуті* (рис. 8.9,є). Розрізняють також різці *чистової* і *чорнової* обробки.

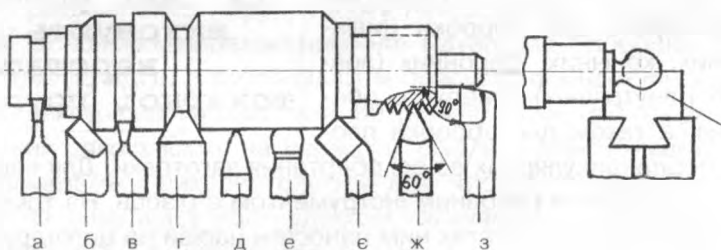


Рис. 8.9. Типи токарних різців

Залежно від призначення (виду обробки) різці поділяють на: *прохідні*, *підрізні*, *відрізні*, *розточувальні*, *нарізні*, *канавочні*, *фасонні*.

Прохідні різці призначені для обточування зовнішніх поверхонь (рис. 8.9,а,б,е,ж). Прохідні різці (прямі або упорні) з головним кутом у плані ($\varphi = 90^\circ$ (рис. 8.9,з) застосовують для оброблення зовнішніх або торцевих поверхонь (наприклад, при виготовленні ступінчастих валів). Прохідний відігнутий різець (рис. 8.9,є) - універсальний, дає змогу обробляти циліндричну поверхню і підрізати торець.

Для чистової обробки застосовують різці двох типів: різці із заокругленою верхівкою (рис. 8.9,д) та широкі чистові різці з прямою головною різальною кромкою (рис. 8.9,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. 8.9,а). Довжина головки цих різців повинна бути дещо більшою за радіус заготовки, що розрізають.

Розточувальні різці застосовуються при розточуванні наскрізних і глухих отворів, а *нарізні* - для нанесення зовнішніх (рис. 8.9,ж) і внутрішніх нарізів. Форма різальної кромки таких різців повинна відповідати профілю нарізу. Головні різальні кромки різця (рис. 8.9,ж) для нарізання симетричних нарізів заточують під кутом 60° .

Канавочні різці застосовують для прорізання канавок різного профілю: прямокутних (рис. 8.9,в), подібних до трапеції (рис. 8.9,г) тощо. *Фасонні різці* (рис. 8.9,і) застосовують для виготовлення і оброблювання складних фасонних поверхонь. Профіль різальної кромки такого різця повинен відповідати профілю оброблюваної поверхні.

На верстатах цих груп виконують свердління, 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 потрібної 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. *Розточування* отворів різцями здійснюють тоді, коли є необхідність додержання точних координат осей отворів.

Оброблювання отворів з метою отримання точних розмірів і малої шорсткості називають *розвертуванням*. Робоча частина

15. Які види робіт виконуються на свердлильних і розточувальних верстатах? Який інструмент застосовують для цього?

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 та ін. Здійснюють зенкування за допомогою циліндричних або конічних зенкерів (зенковок).

Цекування - це оброблення торцевих поверхонь під гайки, шайби і 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 обробці деталей цими інструментами (крім різця) їм надається головний обертальний рух (рух різання) і вісьове переміщення (рух подачі).

16.3 яких елементів складається спіральне свердло? Як визначають режим різання і розмір шару, що зрізається?

Спіральне свердло складається з таких основних конструктивних елементів (рис. 8.10,а): робочої частини (I), що поділяється на різальну або забірну (II) і центруючу (III); шийка-

виточка (IV) для виходу шліфувального круга; хвостовика (V), (як правило, конічного) з лапкою (VI). Діаметр свердла дещо зменшується у напрямку хвостовика для зменшення тертя свердла по стінках отвору. Різальна частина свердла (рис. 8.10,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).

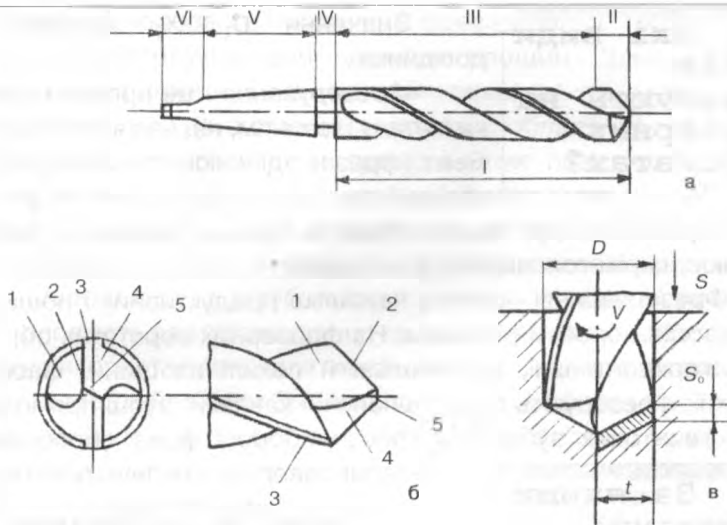


Рис. 8.10. Елементи спірального свердла (а,б) і розміри шару металу, що зрізується (в)

Швидкість різання (м/хв) під час свердління (зенкерування) отворів визначають з виразу:

$$V = \frac{\pi D n}{1000}$$

де: D - зовнішній діаметр свердла, мм;

n - частота обертання, хв^{-1} (рис. 8.10, в).

Глибина різання при свердлінні t дорівнює половині діаметра отвору:

$$t = D / 2 \text{ мм}$$

Подачу визначають за формулою:

$$S_o = C_s D^{X_s}$$

де: C_s , X_s - коефіцієнти, що залежать від оброблюваного матеріалу, точності обробки і шорсткості поверхні.

17. Які види робіт виконують на фрезерних верстатах?

Значення C_s , X_s наведені у довідниках.

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 найбільш продуктивних і поширених методів обробки різанням. На фрезерних верстатах обробляють горизонтальні, вертикальні й похилі площини, фасонні поверхні; фрезерують пази і шпоночні канавки, зубці прямозубних й гвинтових зубчастих коліс; набором фрез обробляють складні поверхні, виконують нарізи.

18. За якими ознаками класифікують фрези? Які особливості їх застосування?

Фреза - це тіло обертання, на поверхні якого розміщені різальні зубці. Залежно від форми і призначення фрези поділяють на циліндричні, торцові, дискові,

кінцеві, кутові, нарізні (різьбові), черв'ячні та ін. За формою задньої поверхні зубців розрізняють фрези з гострозаточеними і затіленими зубцями (кут заточування відповідно до 6° і 25°). За конструктивними ознаками фрези поділяють на суцільні та зі вставними зубцями (ножами). Суцільні фрези виготовляють переважно з 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 й застосовуються для обробки площин. Суцільні гвинтові *зубчасті фрези* виготовляють з великими і малими зубцями від-

Обробка металів різанням

повідно 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 шліцеві 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 і торцевій поверхнях застосовують для прорізування канавок кутового профілю. Їх широко використовують для виготовлення фрез, зеркерів, розверток тощо. Для обробки деталей складної форми, найчастіше криволінійного профілю, використовують *фасонні фрези*. При нарізуванні зубців великомодульних зубчастих колес використовують *пальцеві фрези*.

На верстатах цієї групи виконують обробку металів 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 при підвищених вимогах щодо точності розмірів, форми і високої чистоти поверхні. Високу точність виготовлення виробів забезпечує шліфування спеціальними м'яки-

19. Які роботи виконують і який інструмент застосовують на шліфувальних, полірувальних і доводочних верстатах?

ми високопористими кругами за рахунок зрізання дуже тонкої (5 мкм) стружки.

Тонке точіння здійснюють із застосуванням великих швидкостей різання при малих товщинах зрізуваного шару. Найкращим матеріалом для операцій 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 вісі (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 її обертального і поступального рухів вздовж осі руху оброблюваної деталі та коливального руху брусків. Така обробка забезпечує шорсткість (чистоту) поверхні R_a до 0,025-0,012.

Притирання забезпечує одержання точних розмірів (до 0,1 мкм) і дуже малу шорсткість поверхні ($R_a=0,025-0,012$). 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 ін. Притирання виконують на універсальних і спеціальних притирочних верстатах або вручну.

Полірування - кінцева обробка виробів дрібнозернистим абразивом зі зв'язкою (маслом, сумішшю воску, парафіну, сала з гасом), нанесеного на поверхню круга, диска або стрічки з м'я-

Обробка металів різанням

кого 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 в кілька атмосфер 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 виконуваних на верстатах робіт, їх поділяють на такі основні типи: круглошліфувальні - для обробки зовнішніх поверхонь обертання; внутрішньо-

**20. Які основні типи
верстатів і схеми
шліфування існують?
Які елементи різання
враховують при
шліфуванні?**

шліфувальні - для обробки внутрішніх поверхонь обертання; плоскошліфувальні - для обробки площин; спеціальні - шліцешліфувальні, зубошліфувальні та ін.; заточувальні - для заточування інструмента. Найбільш поширеними є круглошліфувальні й плоскошліфувальні верстати.

Залежно від форми оброблюваних деталей і необхідності обробки тієї чи іншої поверхні 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. Найпоширенішими є схеми кругового і плоского шліфування.

Під час кругового зовнішнього шліфування з поздовжньою подачею (рис. 8.11,а), як і при інших видах шліфування, головний рух зі швидкістю $V_{кр}$ здійснює шліфувальний круг. Заготовка обертається зі швидкістю V_z і робить поступальне переміщення $S_{пз}$ вздовж вісі (поздовжня подача). Поперечну подачу S_n на глибину шліфування t здійснює шліфувальний круг наприкінці поздовжнього ходу в напрямку, перпендикулярному вісі заготовки.

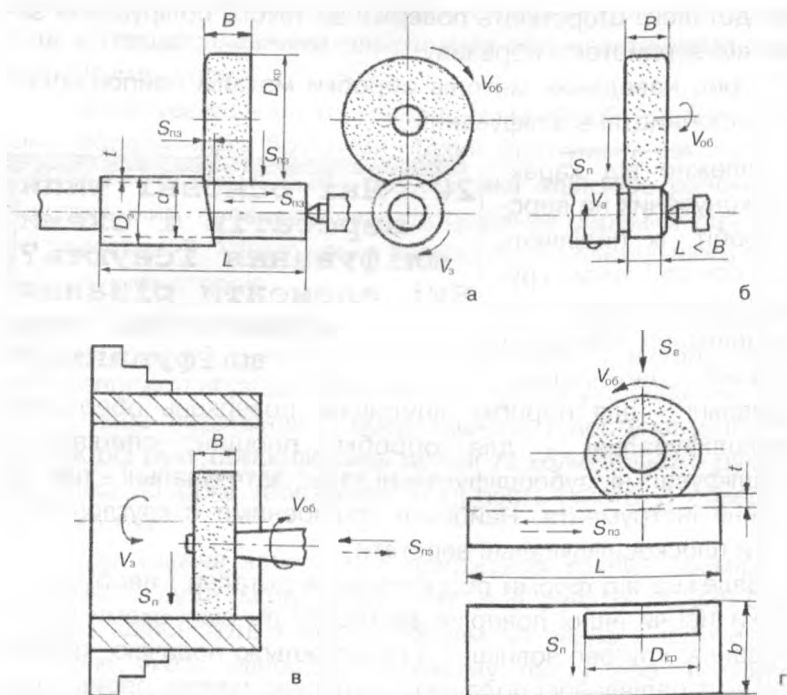


Рис. 8.11. Схеми кругового (а-в) і плоского (г) шліфування: B - ширина шліфувально круга, $D_{кр}$ - діаметр шліфувального круга, D_z - діаметр заготовки до обробки, d - діаметр заготовки після обробки, b - ширина плоскої заготовки

При шліфуванні з поперечною подачею (врізання) шліфувальний круг (рис. 8.11,б) робить обертальний рух зі швидкістю

$V_{об}$ 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. 8.11,в) основним робочим рухом є обертання шліфувального круга зі швидкістю $V_{кр}$, який здійснює також і зворотно-поступальне переміщення зі швидкістю поздовжньої подачі $S_{пз}$ 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. 8.11,г) або торцем круга заготовка, що закріплена на столі, робить обертально-поступальний рух поздовжньої подачі $S_{пз}$. Шліфувальний круг, окрім головного руху зі швидкістю $V_{кр}$, здійснює в кінці поздовжнього ходу поперечну подачу S_n , а після шліфування всієї площини - вертикальне переміщення S_v на глибину різання t .

На рис. 8.11 показані основні елементи різання: швидкість, подача і глибина різання. Швидкістю різання для всіх видів шліфування є швидкість $V_{кр}$, м/с шліфувального круга, що робить головний рух. При круговому шліфуванні елементами різання є кругова швидкість заготовки, поздовжня і поперечна подачі (рис. 8.11,а). Кругова швидкість заготовки V_3 , м/хв - це кругова подача. Поздовжня подача $S_{пз}$, мм/об - це переміщення заготовки відносно шліфувального круга за один оберт. Поперечна подача S_n - це величина переміщення шліфувального круга в напрямку, перпендикулярному вісі 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, елементами режиму різання є поздовжня, поперечна і вертикальна подачі (рис. 8.11,г).

21. Які основні параметри характеризують абразивний інструмент?

Однією з найважливіших характеристик абразивного інструменту, від якої залежить продуктивність і якість обробки, є *зернистість* (величина зерна) абразиву. Залежно від розміру зерна абразиви позначають номерами. Грубозернисті (2000-160 мкм) мають номери від 200 до 16, їх називають шліфзернами. 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 M40 до M5.

Алмазні матеріали за розміром зерна поділяють на дві групи: шліфпорошки і мікропорошки. Їх зернистість позначається дробом, в якому чисельник відповідає найбільшому розміру зерна основної фракції, а знаменник - найменшому. Шліфпорошки мають номери від 630/500 до 50/40 мкм, мікропорошки - від 60/40 до 1/0 мкм.

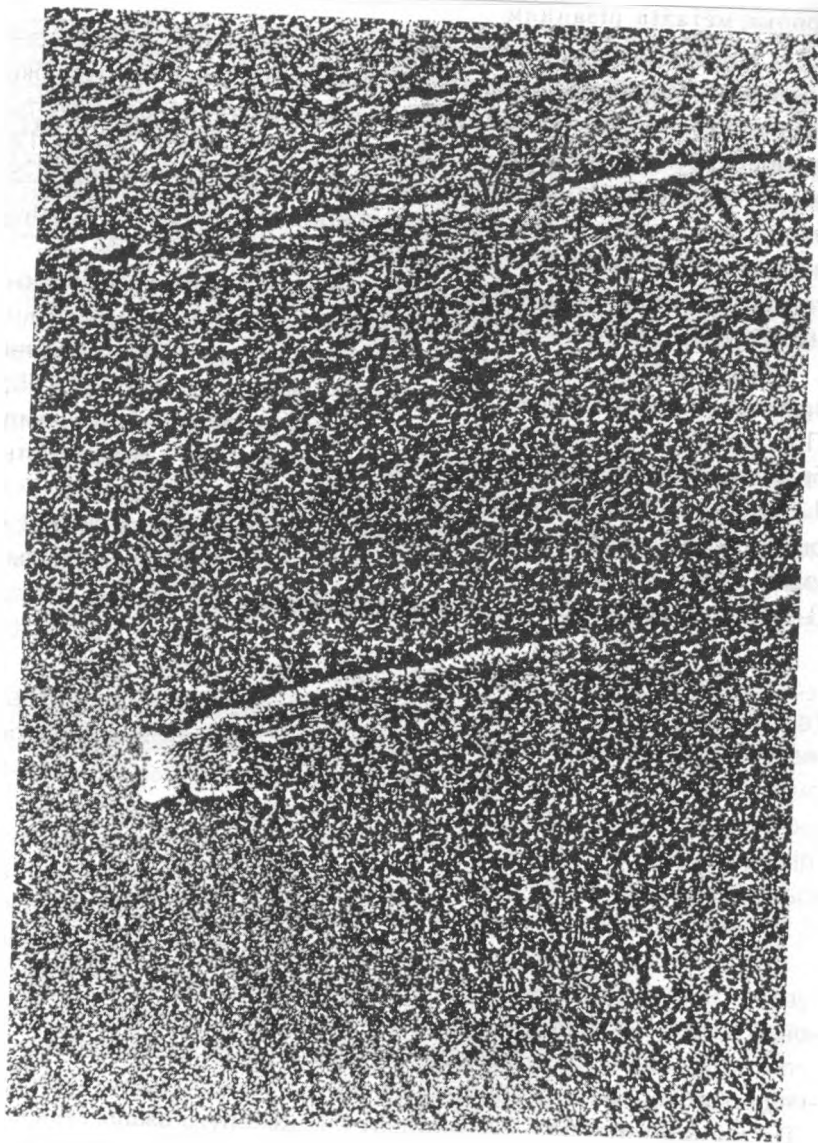
Другою важливою характеристикою абразивного інструменту є *зв'язуюча речовина* (неорганічна, органічна, металева), що з'єднує абразивні зерна в одне ціле. На практиці широко застосовують інструмент з використанням неорганічної зв'язуючої речовини на основі вогнетривкої глини - керамічний (К), на основі синтетичної смоли - бакелітовий (Б), на основі каучуку і сірки - вулканітовий (В). Металеві зв'язуючі речовини складаються з металевої основи (порошки Sb, Al, Cu та ін.) і наповнювача. Їх застосовують переважно в алмазних кругах.

Третім параметром, що характеризує абразивний інструмент, є *твердість*. Цей показник визначає опір зв'язуючої речовини вириванню зерен абразиву під дією зовнішньої сили. Розроблено шкалу, що має 7 класів твердості (вони також поділяються на кілька ступенів): Т - твердий, ВТ - досить твердий, ЧТ - 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 характеризує також їх форма. Так, круги прямого профілю позначають ПП.

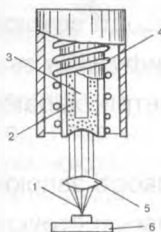
Регламентована швидкість різання керамічними і бакелітовими кругами до 35 м/с, а вулканітовими - 40 м/с.

Всі основні характеристики відображені у маркуванні абразивних матеріалів. Так, круг марки 24А10ПС27К5; ПП500х50х305 розшифровують таким чином: 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; 305 - діаметр отвору.



Структура ковального виливка (35 т) середньовуглецевої спокійної сталі

**зварювальна дуга
електрод
шлак
шов
флюс зварювання
плазма
вакуум
лазер
ультразвук
зона термічного впливу**



Питання, висвітлені у розділі 9

1. У чому сутність зварювання? Як здійснюють і класифікують основні способи зварювання?
2. Що таке зварювальна дуга? Які вимоги існують щодо джерел зварювального струму?
3. Які основні параметри характеризують ручне дугове зварювання?
4. Автоматичне і напівавтоматичне зварювання, чим вони характеризуються?
5. У чому сутність і технологічні особливості електрошлакового зварювання?
6. Що таке дугове зварювання в захисній атмосфері? Які існують різновиди цього процесу?
7. Чим характеризується плазмово-дугове зварювання?
8. У чому сутність і особливість зварювання електронним променем у вакуумі?
9. Що таке газове зварювання і різання металу?
10. Що таке лазерне зварювання?
11. У чому сутність електричного контактного зварювання. Які параметри характеризують цей процес?
12. Які особливості зварювання тертям і газопресуванням?
13. Що таке дифузійне зварювання?
14. Які параметри характеризують ультразвукове зварювання?
15. Які особливості зварювання вибухом?
16. Які особливості структур металу зварного шва і зони термічного впливу?

Зварюванням називають технологічний процес утворення нероз'ємних з'єднань металевих виробів, що здійснюється у спосіб використання

1. У чому сутність зварювання? Як здійснюють і класифікують основні способи зварювання?

міжмолекулярних і міжатомних сил зчеплення. Для виникнення цих зв'язків необхідно поверхні, що зварюють, наблизити до відстані, відповідної атомному радіусу. Це стає можливим за умови усунення причин, що заважають такому зближенню (мікронерівності, оксидні та органічні плівки, адсорбовані гази), і надання атомам певної енергії (енергії активації). Ця енергія може передаватися у вигляді теплоти (термічна активація) та у вигляді пружно-пластичної деформації (механічна активація). Відповідно цьому всі способи зварювання поділяють на дві основні групи: зварювання плавленням і зварювання тиском (пластичним деформуванням).

При зварюванні плавленням розплавляють або тільки основний метал по кромках, які з'єднуються, або основний і додатковий метал (електродний або присадочний). Для розплавлення основного і присадочного металів необхідна температура понад 2500°C.

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, напівавтоматичним.

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).

2. Що таке зварювальна дуга? Які вимоги існують щодо джерел зварювального струму?

Зварювальною дугою називають стаціонарний електричний розряд у газопаровій атмосфері між електродами, що знаходяться під напруженням. Відстань між електродами називають областю дугового розря-

ду або довжиною дуги (приблизно дорівнює діаметру електрода). Запалювання дуги при зварюванні починається з короткого замикання електрода з виробом або з високочастотного електричного розряду (в разі використання плавких електродів). Зварювальна дуга як концентроване джерело енергії забезпечує температуру стовпа дуги 6000-7000°C і температуру катодної і анодної плям відповідно 2400 і 2600°C. У рівноважному стані залежність між напруженням і струмом виявляє статична вольтамперна характеристика дуги, що складається з трьох ділянок: падаючої, жорсткої і зростаючої. Найпоширеніша дуга з жорсткою характеристикою.

Зварювальну дугу можна живити постійним струмом (від генераторів і випрямовуючих установок) або перемінним (від зварювальних апаратів чи трансформаторів). При зварюванні прагнуть до мінімального напруження на дузі. Тому регулювання потужності дуги здійснюють зміною сили струму, керуючи його вольтамперною характеристикою.

До джерел зварювального струму ставлять такі вимоги:

- легке запалювання дуги і безпечність роботи (досягають напруженням холостого ходу 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 не повинен перевищувати робочий струм більше ніж у 1,5 рази).

Для виконання цих вимог найчастіше використовують джерело перемінного або постійного струму з напругою

Зварювання

холостого ходу 60-80 в з падаючою вольт-амперною характеристикою регульованої крутизни.

Зварювальне обладнання ручного дугового зварювання складається з джерела живлення дуги, зварювальних провідників, електродотримача і електродів. При зварюванні неплавкими електродами застосовують вуглецеві (графітові) електроди діаметром 6-30 мм і довжиною 200-300 мм або вольфрамові електроди (при зварюванні в інертних газах) діаметром 1-6 мм. Для зварювання плавкими електродом з покриттям використовують металеві електроди діаметром 1,6-12 мм і довжиною 150-450 мм.

Під час ручного зварювання зварник маніпулює електродом, підтримуючи задану довжину дуги, здійснює подачу електрода в дугу в міру його плавлення, а також переміщує його вздовж заготовки. Схема зварювання електродом з покриттям наведена на рис. 9.1. До складу покриття входять стабілізуючі (йонізуючі), газоутворюючі, шлакоутворюючі, розкислюючі й легуючі компоненти. Стабілізуючі - це сполуки лужних і лужноземельних металів (наприклад,

3. Які основні параметри характеризують ручне дугове зварювання?

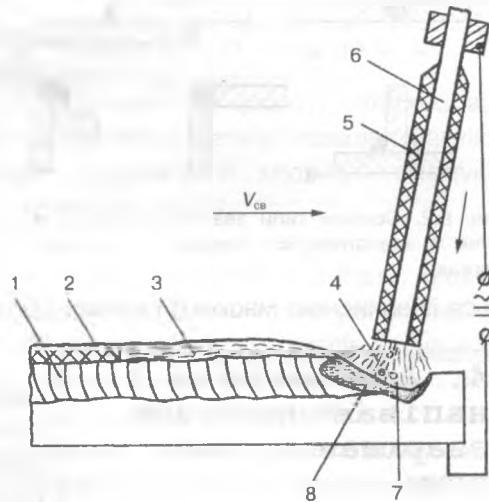


Рис. 9.1. Схема зварювання електродом з покриттям: 1 - зварний шов, 2 - тверда шлакова корка, 3 - рідка шлакова ванна, 4 - газова захисна атмосфера, 5 - покриття електрода, 6 - стрижень електрода, 7 - зварювальна дуга, 8 - рідка металева ванна

крейда). Газоутворюючі сприяють утворенню захисного газового середовища (деревне і харчове борошно, целюлоза тощо). Шлакоутворюючі компоненти, утворюючи шлак, захищають електродний метал, метал зварювальної ванни і гарячого шва від впливу повітря (оксиди металів та неметалів - марганцева руда, титанова руда, каолін тощо). Розкислюючі компоненти - це сполуки, які мають більшу спорідненість до кисню. Вони необхідні для видалення кисню з ванни і шлаків (феромарганець, феротитан, феросіліцій тощо). Легуючі компоненти застосовують для одержання потрібного хімічного складу і властивостей зварного шва.

Ручне електродугове зварювання ефективне при одержанні всіх типів зварних з'єднань (рис. 9.2) і особливо при зварюванні коротких, переривчастих швів складної конфігурації і різного

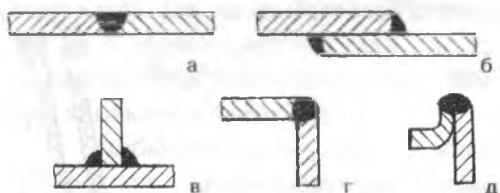


Рис. 9.2. Основні типи зварних з'єднань: а - встик, б - внапуск, в - таврові, г - кутові, д - торцеві

(нижнього, вертикального, горизонтального, стельового) розташування шва у просторі.

До недоліків цього способу зварювання відносять важкі умови праці (працювати доводиться із захисною маскою) і низьку продуктивність.

4. Автоматичне і напівавтоматичне зварювання, чим вони характеризуються?

Під час автоматичного зварювання під флюсом забезпечується автоматичне запалювання і підтримування стабільного режиму горіння дуги, подача електродного дроту і переміщення електро-

да механізовані (рис. 9.3). При зварюванні під флюсом дуга збуджується між електродом (1) і виробом, що зварюють (11), і

Зварювання

горить під шаром флюсу (4), який надходить в зону зварювання з бункера (5).

Частина флюсу, що оточує дугу, розплавлюється, утворюючи на поверхні розплавленого металу (7) ванну рідкого шлаку (8). У міру переміщення дуги метал зварювальної ванни кристалізується з утворенням шва (9), покритого кіркою (10), яка легко відділяється. Флюс захищає дугу і зварювальну ванну від окислення з атмосфери, забезпечує нормальне формування шва, запобігає розбризкуванню металу. 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 2 рази, підвищення продуктивності від 3 до 20 разів, поліпшує умови праці. Його застосовують для зварювання однотипних вузлів з довгими прямолінійними і 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 за такого способу захищають флюсом або захисним газом (аргоном, гелієм, двоокисом вуглецю). Напівавтоматичним зварюванням роблять короткі та криволінійні шви, які недоцільно зварювати автоматичним зварюванням.

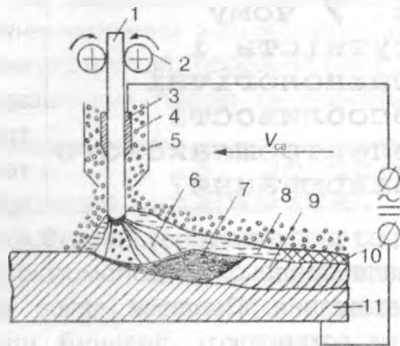


Рис. 9.3. Схема автоматичного зварювання під флюсом: 1 - електрод, 2 - механізм подачі дроту, 3 - провідник струму, 4 - флюс, 5 - бункер, 6 - зварювальна дуга, 7 - зварювальна ванна, 8 - шлакова ванна, 9 - зварювальний шов, 10 - шлакова кірка, 11 - основний метал.

5. У чому сутність і технологічні особливості електрошлакового зварювання?

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) - це процес з'єднання металів при якому розплавлення зон зварювання основного і електродного металів здійснюється теплотою, що виділяється при проходженні електричного струму через шлакову ванну (рис. 9.4). Шлакову ванну (2) одержують безпосередньо за допомогою зварювальної дуги на початку зварювання. Подаючи флюс до дуги, створюють значний шар електропровідного шлаку. Після цього дуга занурюється в шлак, стає довшою і нестабільною. Це призводить до припинення дугового розряду і замикання струму у зварювальному ланцюгу через рідкий шлак. Останній нагрівається джоулевою теплотою при проходженні електричного струму. Плавлення електродного дроту, пластини або спеціального мундштука, що подаються до зварювальної ванни, забезпечує теплота перегрітого (до 2000°C) шлаку. Частина теплоти витрачається також на оплавлення кромок (4) зварюваних заготовок.

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 кромок. ЕШЗ застосовують для з'єднання товстостієвих (понад 20 мм) заготовок, виливків, поковок і зливків чавуну, сталі, сплавів кольорових металів. Зварювальні

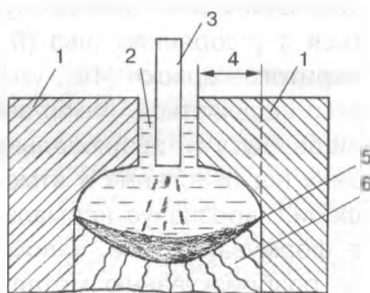


Рис. 9.4. Схема електрошлакового зварювання: 1 - зварюваний метал, 2 - шлакова ванна, 3 - електродний дріт, 4 - величина проплавлення кромок металу, 5 - металева ванна, 6 - зварювальний шов

Зварювання

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.

При цьому способі зварювання зварювальну дугу, основний метал і електрод захищають в атмосфері газу в камері або струменем газу, який пода-

**6. Що таке
дугове зварювання в
захисній атмосфері?
Які існують
різновиди цього
процесу?**

ють до місця зварювання спеціальним пальником. Для зварювання можна використовувати 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 застосовуються для зварювання легированих сталей і сплавів на основі Ti, Zr, Nb, Al, Mg товщиною 0,1-100 мм. Найпоширеніше аргонно-дугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом. Частіше застосовують дугу постійного струму прямої полярності. Завдяки цьому переважна більшість теплоти дуги витрачається на розплавлення основного металу. Перемінний струм використовують при зварюванні сплавів на основі Al і Mg.

Якісні з'єднання ряду сплавів одержують також і в середовищі активних газів, які можуть взаємодіяти 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 зва-

ривальний дріт з підвищеним вмістом Si і Mn (1-2 %), які відновлюють оксиди заліза. Продукти реакції спливають при цьому на поверхню шва у вигляді шлаку. Під час такого зварювання часто використовують дугу зворотної полярності.

У разі зварювання в захисній атмосфері об'єм ванни невеликий і вона швидше охолоджується. Це дозволяє, на відміну від зварювання під флюсом, здійснювати процес у вертикальному і перевернутому положеннях. Так, наприклад, можливе зварювання труб встик завдяки руху автоматичної зварювальної головки навколо стику труби.

7. Чим характеризується плазово-дугове зварювання?

При цьому способі зварювання джерелом теплоти є струмінь газу, йонізованого в дузі, яка під час співудару з менш нагрітим тілом дейонізується з виділенням значної кількості теплоти. Це дає змогу вважати її самостійним джерелом нагрівання. Температура струменя плазми залежить від ступеня йонізації газу. Для її підвищення використовують стовп стиснутої дуги, тобто дуги, що горить у вузькому каналі, через який під тиском подають газ (аргон, азот, водень), збільшуючи цим ступінь її обтискування. За таких умов температура газу в стовпі дуги досягає 30000°C. Генератор плазми (йонізованого газу) називають плазмотроном. Останнім часом створено плазмотрони, в яких замість аргону і аргоно-водневої суміші застосовують більш дешевий вуглекислий газ.

Існують два варіанти використання струменя плазми: 1) суміщений з дугою, яка горить між вольфрамовим електродом (катодом) і виробом (анодом); 2) відособлено від дуги. За першим варіантом здійснюють термічне різання, за другим - зварювання, наплавлення і напилення. Останній варіант прийнятний також для роботи з неелектропровідними матеріалами. Швидкість плазового зварювання вуглецевих сталей сягає кількох сотень метрів за годину.

Зварювання

Зварювання
електронним променем відносять до зварювання плавленням. Проте на відміну від дугових методів зварювання його виконують у глибокому вакуумі (10^{-2} - 10^{-4} Па) за умов дефіциту йонів, що переносять електричний розряд. З цієї причини дуговий електричний розряд у вакуумі не стійкий.

8. У чому сутність і особливість зварювання електронним променем у вакуумі?

При зварюванні у вакуумі заготовку розміщують у камері. Джерелом тепла є потік прискорених електронів. Швидкість електронів, що дорівнює приблизно половині швидкості світла, забезпечується високою прискорюючою 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 у процесі гальмування внаслідок переходу кінетичної енергії в теплову виділяється теплота. Температура у місці зварювання досягає $5000-6000^{\circ}\text{C}$. Це надає променю високої проплавлювальної здатності, що дозволяє зварювати за один прохід заготовки товщиною до 50 мм, отримувати шви мінімальної товщини, що виключає викривлення заготовок при зварюванні. Співвідношення ширини шва до його глибини досягає 1:20.

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) також дає можливість пробивати отвори в сапфірах, рубінах, алмазах тощо, зварювати різномірні матеріали (метали і неметали) різної товщини з різними температурами плавлення та іншими теплофізичними характеристиками.

9. Що таке газове зварювання і різання металу?

Під час газowego зварювання основний і присадочний метали розплавляються теплом газowego полу-м'я, яке одержують при згорянні горючого газу в суміші з киснем. Газовим різанням називають процес спалювання металів у струмені кисню.

Паливом найчастіше є ацетилен (C_2H_2), іноді водень, нафтові гази, пари бензину або гасу. При спалюванні ацетилену досягають найвищої температури $3200^{\circ}C$. Його одержують у спеціальних генераторах при взаємодії карбіду кальцію (CaC_2) з водою. З одного кілограма карбіду утворюється близько 300 л ацетилену.

Основний інструмент газowego зварювання - *пальник*, призначений для змішування у певних пропорціях газу і кисню. За принципом дії пальники поділяють на інжекторні низького тиску і безінжекторні рівного тиску. Розрізняють також одно- і багатополуменеві пальники. Найбільш поширеним є інжекторно-зварювальний пальник (рис. 9.5). Під час його роботи кисень з балона надходить до інжектора (5) і зі значною швидкістю витікає з конусного отвору інжектора, що сприяє створенню значного розрядження в камері (4). За рахунок цього ацетилен, що подається при низькому залишковому тиску (0,01-0,005 ат.), засмоктується до камери змішування (3), утворюючи суміш, яка надходить до наконечника (2) і при виході з мундштука (1) підпалюється.

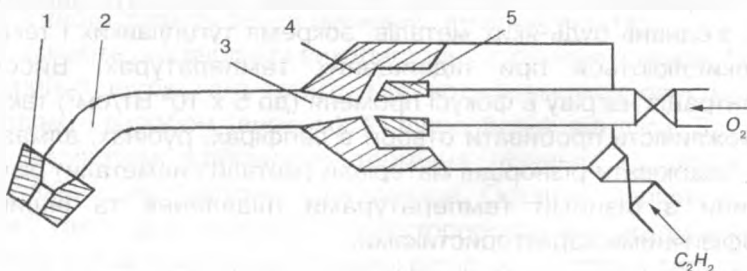


Рис. 9.5. Схема інжекторно-зварювального ацетиленового пальника: 1 - мундштук 2 - наконечник; 3 - камера змішування; 4 - камера розрядження; 5 - інжектор

Зварювання

Поширений спосіб з'єднання елементів при газовому зварюванні - встик. Метод газового зварювання забезпечує плавне нагрівання і повільне охолодження виробів. Його застосовують для ремонтних робіт, при виготовленні виробів з сталі й сплавів кольорових металів, наплавки тощо.

При зварюванні сталі газове полум'я відповідає співвідношенню $O_2/C_2H_2 \approx 1$, при зварюванні латуні використовують окислююче полум'я ($O_2/C_2H_2 > 1$), при зварюванні чавунів і кольорових металів - науглецювуюче полум'я ($O_2/C_2H_2 < 1$). Крім цього, для зварювання кольорових металів використовують флюси.

Газовий різак відрізняється від зварювального пальника тим, що його наконечник утворює прямий кут зі стволом різака. Крім цього, він має додаткову трубу для подачі кисню через центральний отвір мундштука (рис. 9.6). Різання починають з нагрівання металу (3) у вихідній точці різання до температури зполум'яніння металу у 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 нагрітий метал, кисень запалює його. Розплавлені оксиди (5), що утворюються, захоплюються струменем кисню і виносяться з зони різання (4).

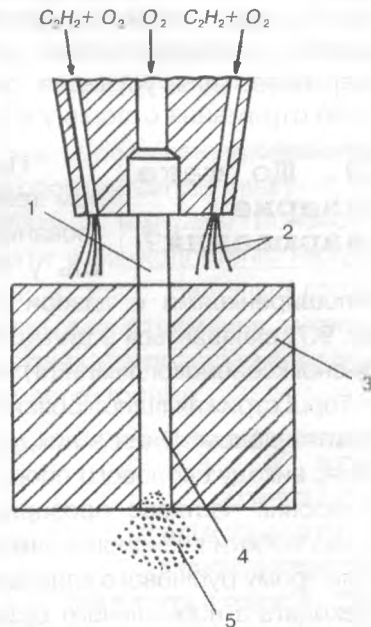


Рис. 9.6. Схема газокисневого різання металів : 1 - струмінь різального кисню; 2 - полум'я; 3 - метал виробу; 4 - зона різання; 5 - розплавлені оксиди

Газовому різанню піддають лише такі метали, які відповідають певним вимогам. Розглянемо основні з них. Температура плавлення оксидів повинна бути меншою від температури плавлення металу; 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, коли 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 важкоплавких оксидів. Розрізняють три типи кисневого різання: розподілювальне різання (розкрюювання металу), поверхневе (для усунення поверхневих дефектів), різання з метою отримання отворів у виробах з металу і бетону.

10. Що таке лазерне зварювання?

При лазерному зварюванні джерелом теплової енергії є потужний сконцентрований світловий промінь, який отримують у спеціальних установках - лазерах. Найпоширенішими є лазери зі штучним рубіном. Такий лазер (рис. 9.7) складається з циліндричного рубінового стрижня (3), імпульсної ксенонової лампи (4), лінзи (5) і охолоджувальної системи (2). Торці стрижня відполіровані й покриті сріблом. Один з них, що сприяє виходу світлового променя назовні, частково прозорий. Під час роботи ксенонової лампи атоми хрому рубінового кристала переходять з нормального стану в збуджений з іншим енерге-

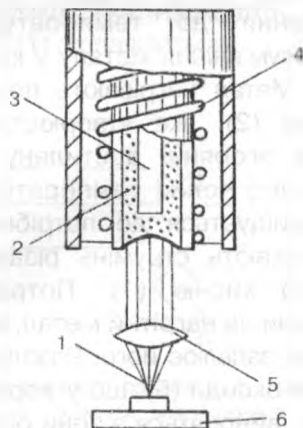


Рис. 9.7 Схема лазерного зварювання: 1 - сфокусований потік монохроматичного світла; 2 - система охолодження; 3 - рубіновий стрижень; 4 - ксенонова лампа; 5 - лінза; 6 - виріб

Зварювання

тичним рівнем. Проте через кілька мілісекунд вони знову повертаються до нормального стану, випромінюючи хаотично фотони червоного світла. Їх потік вздовж осі стрижня викликає випромінювання нових фотонів, які поперемінно відбиваються від дзеркальних торцевих граней, збільшуючи інтенсивність загального випромінювання. При накопиченні певного рівня фотонів вони у вигляді потоку червоного кольору прориваються через напівпрозорий торець стрижня назовні. Проходячи через лінзу (5), сфокусований промінь (1) попадає на виріб (6). Тривалість імпульсу лазерного променя дорівнює тисячним і мільйонним долям секунди. Питома потужність лазера може перевищувати 10^{10} Вт/см². Під час зустрічі променя зі зварюваним виробом виділяється теплова енергія, температура в місці контакту досягає 6000°C.

Лазерне зварювання дозволяє обробляти вироби в будь-якому середовищі, що передає промінь світла (вакуумі, газі, повітрі). Деталі можна розміщувати в ампулах. Волоконною оптикою промінь можна спрямувати у важкодоступні місця, до приміщень з високою радіоактивністю тощо. Найбільш доцільно застосовувати лазерне зварювання для отримання мікроз'єднань, виготовлення мікроотворів різних композицій металів завтовшки до 0,5 мм, для потреб мікроелектроніки.

Електричне контактне зварювання - це процес утворення нероз'ємного з'єднання за рахунок зчеплення атомів металу, яке здійснюється локальним нагріванням деталей електричним струмом з обов'язковим наступним їх стискуванням. Таке зварювання можна здійснювати без розплавлення металу (при нагріванні до пластичного стану) або з локальним розплавленням у зоні контакту. Серед багатьох різновидів

**11. У чому
сутність
електричного
контактного
зварювання? Які
параметри
характеризують
цей процес?**

електричного контактного зварювання виділяють такі основні типи: точкове, шовне і стикове.

При двосторонньому *точковому* зварюванні (рис. 9.8,а) деталі (1,2) розміщують внапусток одна на одну, затискують з зусиллям P між двома мідними електродами, які підводять струм до місця зварювання. У процесі двостороннього зварювання в нагріванні бере участь увесь струм. При односторонньому зварюванні струм розподіляється між верхньою (1) і нижньою (2) заготовками (рис. 9.8.б) і підкладкою (3) з міді. Односторонній варіант зварювання дозволяє зварювати 2 заготовки, двосторонній - 2-4.

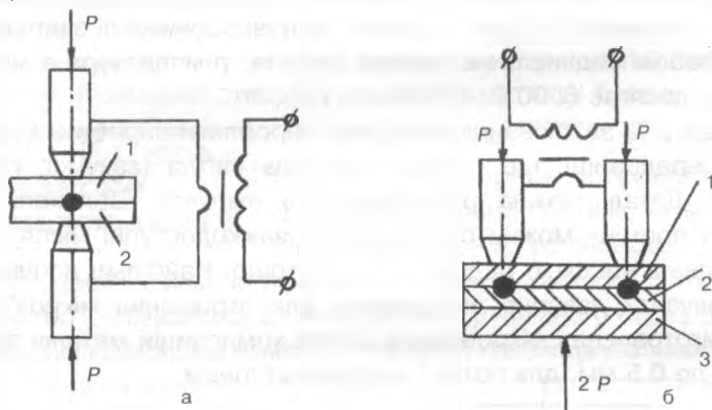


Рис. 9.8. Схеми двостороннього (а) і одностороннього (б) точкового зварювання

Додаткове збільшення тиску (рис. 9.9) здійснюють з метою проковування точки зварювання. Діаметр точки зварювання визначають за формулою:

$$d_t = 2\delta + 3 \text{ мм},$$

де: δ - товщина зварюваного листа.

Рекомендована відстань між точками $L = 2,5 d_t$. Цей вид зварювання застосовують для з'єднання листових конструкцій з вуглецевих і легированих сталей, кольорових металів.

Зварювання

Роликове, або шовне зварювання, характеризується утворенням міцного і щільного шва між заготовками. Шов складається з низки послідовно розміщених точок зварювання, які частково накладаються одна на одну. Такий вид зварювання може бути одно- і двостороннім (рис. 9.10).

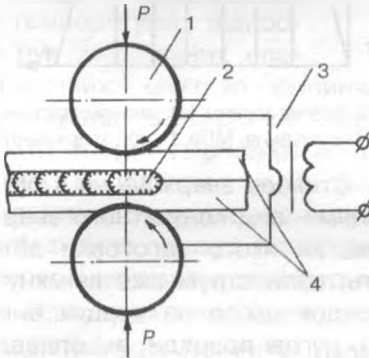


Рис. 9.10. Схема шовного двостороннього зварювання: 1 - дискові електроди, 2 - зварювальне ядро, 3 - джерело живлення, 4 - виріб

до росту зерна і змін 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 судів 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. 9.12). Перед зварюванням заготовки очищують від оксидної плівки, механічною обробкою щільно підганяють торці один до одного. На початку зварювання заготовки стискають, а потім вмикають еле-

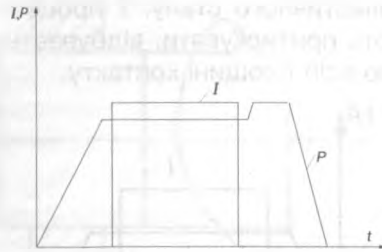


Рис. 9.9. Цикл роботи контактної точкової зварювальної машини: I - струм, А; P - зусилля стискування, МПа; t - час зварювання, с

Процес зварювання здійснюють за двома основними технологічними циклами (рис. 9.11): з безперервним включенням струму (рис. 9.11,а) і з переривчастим включенням (рис. 9.11,б). Перший варіант застосовують для зварювання коротких швів металів, які не схильні

тричний струм, під дією якого місця з'єднання нагріваються до пластичного стану. У процесі зварювання заготовки продовжують притискувати, відбувається потовщення стику і зварювання по всій площині контакту.

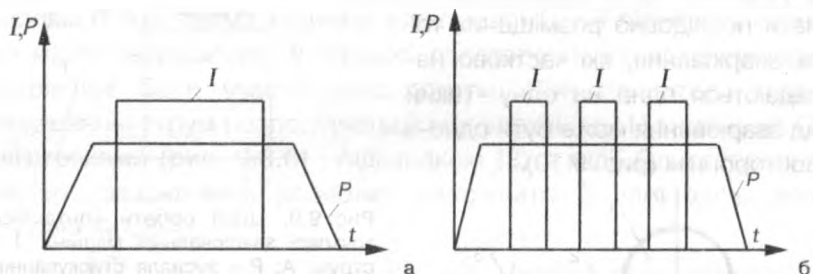


Рис. 9.11. Цикл роботи шовного зварювання з безперервним (а), переривчастим (б) включенням струму: I - струм, A , P - зусилля стискування, МПа, t - час зварювання, с

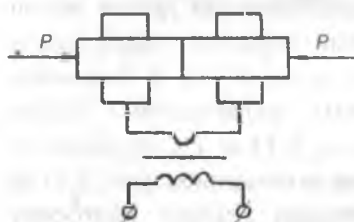


Рис. 9.12. Схема контактного зварювання опором (і оплавленням)

Стикове зварювання з оплавленням - вид контактного зварювання, за якого 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 витісняється з зони дотику і 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 різні метали різних перерізів. Широко застосовують стикове зварювання різального інструменту, залізничних рейок, труб магістральних газо- і нафтопроводів.

12. Які особливості зварювання тертям і газопресуванням?

Ці обидва способи відносяться до зварювання тиском і відрізняються лише джерелом теплоти. Зварювання тертям (рис. 9.13) здійснюють у твердому стані, використовуючи теплоту як наслідок тертя

Ці обидва способи відносяться до зварювання тиском і відрізняються лише

Зварювання

поверхонь зварюваних елементів. Спочатку при їх обертанні руйнуються окисні плівки на поверхнях металів і відбувається перетворення механічної енергії на теплову. Локальне підвищення температури при цьому досягає 950-1300°C. Досягнувши потрібної температури, відносний рух зварюваних елементів майже миттєво припиняють і до нагрітих нерухомих деталей підводять стискуючі напруження. При зварюванні тертям витрати енергії зменшуються у 5-10 разів порівняно з електричним. Перевагами цього виду зварювання є екологічність, відсутність газовиділень і випромінювання. Застосовують його для з'єднання одно- і різномірних металів (сталь з алюмінієм), виготовлення різального інструменту, валів, штоків тощо.

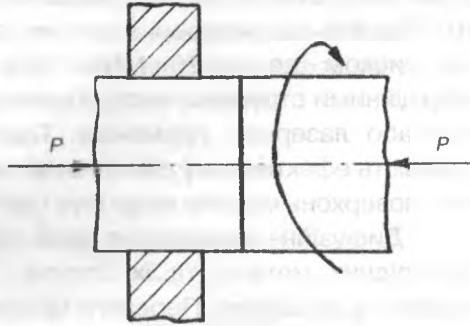


Рис. 9.13. Схема зварювання тертям

При зварюванні газопресуванням торці або кромки заготовок нагрівають полум'ям пальників до пластичного стану або оплавленням. Після цього заготовки притискають одну до одної. Перевагою газопресового зварювання є плавні режими різання і охолодження, воно придатне для проведення ремонтних робіт великих об'єктів. Проте через низьку продуктивність і складність оснащення цей вид зварювання має обмежене застосування.

Сутність дифузійного зварювання зводиться до створення умов для максимальної швидкості дифузії на границі контакту зварюваних деталей, утворення нових зерен, що належать одночасно кожному з контактуючих металів. Для цього температура повинна бути такою, щоб зберегти твердий стан металів і максимально підвищити швидкість дифузійних процесів; тиск має бути нижче порога текучості при збереженні форми заготовок; вакуум застосовують для

13. Що таке дифузійне зварювання?

захисту від окислення. Зварювання здійснюють у вакуумі (10^{-1} - 10^{-3} Па) або в атмосфері інертних газів, нагрітих до 400-1300°C під тиском до 10-20 МПа. Зварювані метали нагрівають індукційними струмами високої частоти (до 600-800°C), електронним або лазерним променем. Температури у цьому інтервалі сприяють ефективному руйнуванню оксидних плівок, щільний контакт поверхонь металів полегшує протікання дифузійних процесів.

Дифузійне зварювання уможливорює з'єднання однорідних і різнорідних металів та їх сплавів, а також металокерамічних виробів з металами. Переваги цього способу зварювання полягають в отриманні міцного з'єднання без помітних змін фізико-механічних властивостей у зоні зварювання. Практично використовують два різновиди технології: без проміжного шару (для однорідних металів) і з проміжним шаром (містить плавкі та неплавкі прошарки). Проте цей спосіб зварювання потребує застосування складного обладнання, обмежує розміри заготовок розмірами вакуумної камери, є досить тривалим (10-30 хв).

Дифузійне зварювання застосовують в електронній, космічній, авіаційній техніці, при створенні багат шарових композиційних матеріалів.

14. Які параметри характеризують ультразвукове зварювання?

Ультразвукове зварювання відносять до зварювання тиском. Для нього характерне застосування ультразвукових механічних коливань і невеликих зусиль стискування. Коливання отримують з використанням ефекту магнітострикції, тобто здатності

деяких металів і їх сплавів до перетворення електромагнітних коливань ультразвукової частоти (15-100 кГц) у механічні тієї ж частоти. Таким ефектом володіють сплави нікелю з залізом (пермалой), кобальту з залізом (пермендюр) тощо. З них виготовляють магнітострикційні перетворювачі.

Зварювання

Заготовки (5) для зварювання (рис. 9.14) розміщують на опорному електроді (6), який притискує заготовки до наконечника (4) хвилеводу (3). Останній з'єднують з катушкою (2) магнітострикційного вібратора (1).

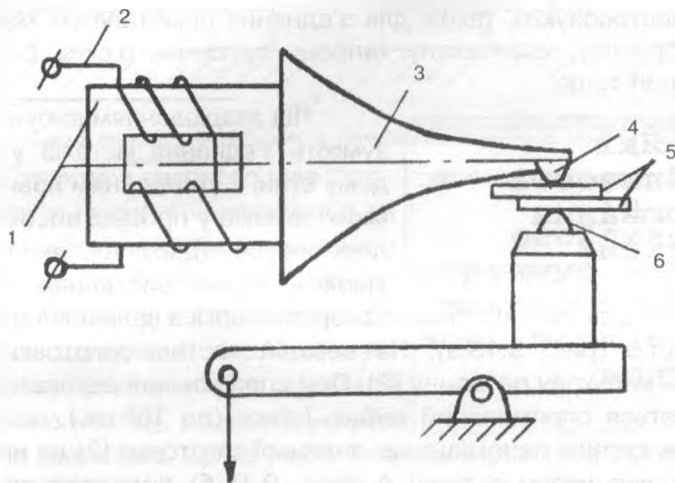


Рис. 9.14. Схема ультразвукового зварювання: 1 - магнітострикційний вібратор, 2 - катушка, 3 - хвилевід, 4 - наконечник, 5 - заготовки, 6 - опорний електрод

Перемінний струм високої частоти, проходячи через катушку, збуджує в ній перемінне магнітне поле, яке передає механічні коливання на її стрижень. Зміна розмірів на торці магнітостриктора невелика - 1-3 мкм. Для збільшення амплітуди коливань застосовують хвилеводи складної форми, забезпечуючи амплітуду коливань до десятків мкм. Ці коливання викликають сили тертя в місцях зварювання, руйнують оксидні плівки, пластично деформують поверхневі шари, нагрівають поверхні металу до 200-1200°C. Таким чином, створюються умови зближення зварювальних матеріалів до відстані взаємодії міжатомних сил, що призводить до утворення міцних зварювальних з'єднань. На спеціальному обладнанні здійснюють зварювання однорідних

і різнорідних металів і сплавів «внапуск» товщиною 0,001-1 мм з утворенням точкових і шовних з'єднань.

За такою технологією добре зварюються алюміній і його сплави, титан, цирконій, нікель; гірше - маловуглецеві, жароміцні та інструментальні сталі, сплави магнію. Ультразвукове зварювання застосовують також для з'єднання неметалевих матеріалів - хлорвінілу, поліетилену, капрону, органічного скла, біологічних тканин тощо.

15. Які особливості зварювання вибухом?

Під зварюванням вибухом розуміють з'єднання металів у твердому стані з утворенням нових атомних зв'язків у процесі високошвидкісного співудару тіл, який здійснюють з використанням енергії

вибухових речовин або інших джерел енергії з великою питомою потужністю (рис. 9.15,а). На верхній частині заготовки розміщують вибухову речовину (2). При спрацюванні детонатора (1) відбувається спрямований вибух, і тиск (до 10^5 ат.), що утворюється, сприяє переміщенню верхньої заготовки (3) до нижньої (4). Під час удару в точці А (рис. 9.15,б) видаляються тонкі поверхневі шари металу, оксидні плівки і забруднення. Відбувається зближення заготовок (3 і 4) до відстані, що забезпечує взаємодію міжатомних сил. Таким способом поверхні в кілька квадратних метрів з'єднують за тисячні долі секунди з досить високою міцністю. Основними параметри зварювання вибухом є швидкість детонації D , нормальна швидкість V_n , кут γ . Вихідний проміжок між зварюваними заготовками дорівнює 2-3 мм.

Цей вид зварювання має певні недоліки і переваги. До переваг способу слід віднести універсальність, самоочищення контактних поверхонь, зміцнення металу біля границь з'єднання, відсутність термічного впливу і прошарків дифузійного походження, можливість багат шарового зварювання, негроміздке просте обладнання. Основними недоліками зварювання вибухом вважають необхідність встановлення заготовок під кутом, складність стикового зварювання, небезпечність застосування вибухових речовин.

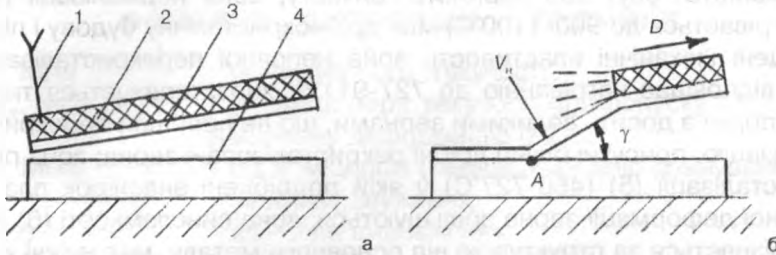


Рис. 9.15. Схема зварювання вибухом: а - вихідне положення, б - процес зварювання

Структура зварного шва утворюється в процесі кристалізації та охолодження зварювальної ванни (рідкий сплав основного і присадочного металів), наступного нагрівання і швидкого охолодження. Центрами кристалізації є кристали основного металу, розташовуються

вони на краях шва, що не розчинилися. Первинна структура шва складається з великих стовпчастих кристалів дендритної будови. У процесі електродугового зварювання при повторному нагріванні до 900-950°C і наступному швидкому охолодженні стовпчастих структура перетворюється на рівноважну дрібнозернисту. Виходячи з цього, структура електродугового зварювання багатшарова - у першому і наступних шарах рівновісна дрібнозерниста, а в останньому - стовпчастих більш груба.

Під час зварювання частина основного металу, що прилягає до шва, нагрівається до високих температур і охолоджується по закінченні процесу зварювання. Ця зона називається зоною термічного впливу або колошовною зоною. Оскільки окремі її ділянки нагріваються до різних температур, вони мають і різну структуру (рис. 9.16). Так, при зварюванні маловуглецевої (доевтектоїдної) сталі зона сплавлення (1) основного металу з присадочним має грубокристалічну будову і незначні лінійні розміри; зона перегріву (2) основного металу (1100-1500°C) зі

16. Які особливості структури металу зварного шва і зони термічного впливу?

зниженими механічними властивостями - грубокристалічну (іноді відманштеттову) або зернисто-голчасту; зона нормалізації (3) (нагрівається до 900-1100°C) має дрібнокристалічну будову і підвищені механічні властивості; зона неповної перекристалізації (4) відповідає нагріванню до 727-911°C, характеризується тим, що поруч з досить великими зернами, що не пройшли перекристалізацію, присутні більш дрібні рекристалізовані зерна; зона рекристалізації (5) (450-727°C) у якій подрібнені внаслідок пластичної деформації зерна збільшуються; зона синеламкості (6) не відрізняється за структурою від основного металу, має нижчі характеристики пластичності.

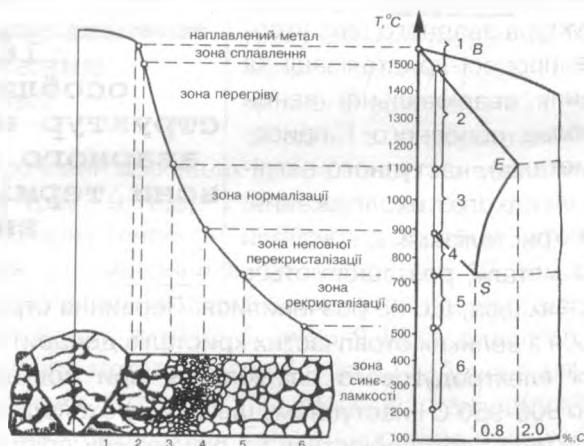


Рис. 9.16. Схема побудови зварного шва і зони термічного впливу вуглецевої сталі

Розміри і механічні властивості зони термічного впливу (а також її окремих ділянок) залежать від способів і режимів зварювання, хімічного складу зварюваних матеріалів. При дуговому зварюванні протяжність зони становить приблизно 6-10 мм, при газовому - 25-28 мм. У разі зварювання високовуглецевих і легированих сталей у зоні термічного впливу можуть утворюватися структури гартування і тріщини. Для забезпечення оптимальних структур і властивостей колошовної зони слід дотримуватися заданого режиму зварювання, застосовувати попередній нагрів або наступну термічну обробку. Завдяки цьому пластичні властивості зварювальних з'єднань значно покращуються.

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів

σ_T , МПа	- фізичний поріг текучості
$\sigma_{0,2}$, МПа	- умовний поріг текучості при допуску на пластичну деформацію 0,2 %
σ_B , МПа	- поріг міцності (тимчасовий опір руйнуванню)
	- відносне звуження
ψ , %	- відносне видовження
δ , %	- модуль Юнга (пружності)
E , ГПа	- модуль зсуву
G , ГПа	- коефіцієнт Пуассона
v	- ударна в'язкість
KCV, КСТ, KCU	- робота деформування та руйнування при ударі стандартних зразків відповідно з V-, T-, U-подібними концентраторами
K_{Ic} , МПа $\sqrt{m}$	- в'язкість руйнування (критичний коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщини відриву при статичному навантаженні й граничному утрудненні пластичних деформацій)
μ	- магнітна проникненість
HB	- твердість за Брінеллем
HV ₁₀	- твердість за Віккерсом
HRC	- твердість за Роквеллом
H_μ , ГПа	- мікротвердість
σ_{-1} , МПа	- поріг витривалості при симетричному циклі навантажень
I , А	- робочий струм
U, B	- напруга
σ_{34} , МПа	- міцність зчеплення покриття з основою
ρ , г/см ³	- густина
T_p	- температура плавлення
λ , Вт/м град	- коефіцієнт теплопровідності
α , град ⁻¹	- лінійний коефіцієнт розширення
ГЦК	- кубічна гранецентрована ґратка
ОЦК	- кубічна об'ємноцентрована ґратка
ГПУ	- гексагональна ґратка
ГЩП	- гексагональна ґратка щільного пакування

Навчальне видання

*Кондратюк Станіслав Євгенович,
Кіндрачук Мирослав Васильович,
Степаненко Валерій Олександрович,
Москаленко Юрій Никонович*

**Металознавство та обробка металів
у запитаннях і відповідях**

Редактор *Т. М. Філіппова*

Комп'ютерна верстка *І. О. Корецька*

Художнє оформлення *О. А. Коваль*

Коректор *Н. Ф. Філіппова*

Під. до друку 1.07.2000. Формат 60х84/16. Папір газетний. Офс. друк.
Гарн. «Прагматика». Ум. друк. арк. 23,3. Обл.-вид. 20,8. Наклад 17000.
Зам. 0166

Підготовлено до друку ПП «Вікторія»

Київ, вул. Артема, 66

Свідоцтво серія ДК № 78

ВАТ «Білоцерківська книжкова фабрика»

Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4

