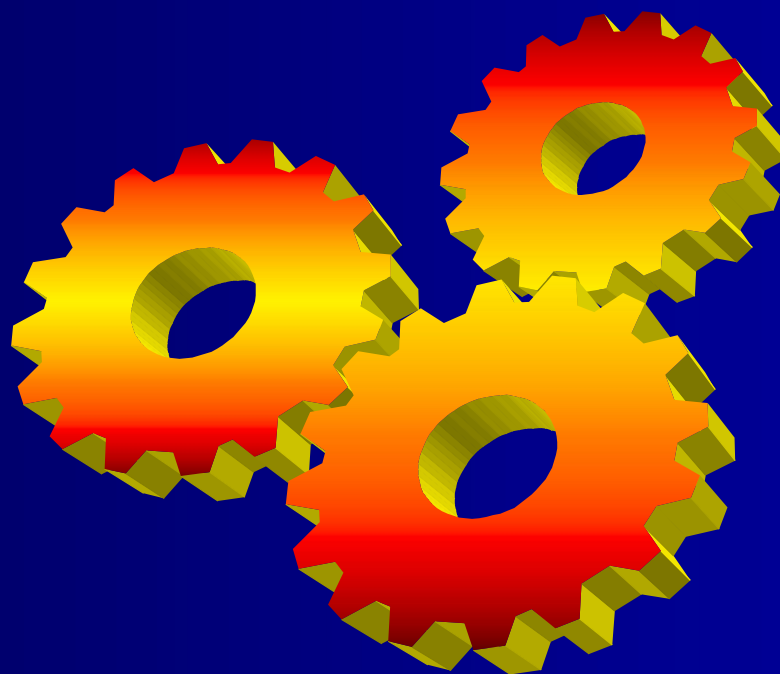


**В.Ф. МОЛЧАНОВ**

**ТЕРМІЧНА ОБРОБКА  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**



Міністерство освіти і науки України  
Дніпродзержинський державний технічний університет

**В.Ф. Молчанов**

# **ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Навчальний посібник*

Дніпродзержинськ  
ДДТУ  
2008

УДК 621.017 (075.8)

В.Ф. Молчанов. Термічна обробка деталей машин. Навчальний посібник. Дніпродзержинськ, Видавництво ДДТУ, 2008.- 216 стор. Рис. 79. Табл.19. Бібліогр.: 31 назв.

*У навчальному посібнику викладені основні положення термічної обробки деталей і заготовок, розглянуті структурні та фазові перетворення в матеріалі при нагріванні та охолодженні, приведені основні види термічної обробки та їх обґрунтування на вибір параметрів, розглянута технологія поверхневого гартування та хіміко-термічної обробки деталей. Приведені конструкції сучасного термічного обладнання та рекомендації по його використанню при термічній обробці деталей машин.*

*Посібник призначений для студентів машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів.*

Рецензенти: Дідик Р.П. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри „Технологія машинобудування” Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ);  
Носков В.О. – доктор технічних наук, лауреат Державної премії України, провідний науковий співробітник Інституту чорної металургії НАН України, професор кафедри «Машини та агрегати металургійного виробництва» Національної металургійної академії України

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів України, лист від 16.06.2007 року, № 14/18-Г-948.

Друкується за рішенням Вченої ради Дніпродзержинського державного технічного університету, протокол № 9 від 31.05.2007 року.

**ISBN 978-966-8551-46-8**

© В.Ф. Молчанов, 2008 р.

© Видавництво ДДТУ, 2008 р.

---

## ПЕРЕДМОВА

Застосування нових конструкційних матеріалів, інтенсифікація різних технологічних процесів, які реалізує сучасна техніка, необхідність зниження запасів міцності, матеріалоемності устаткування разом з підвищенням його надійності вимагають розв'язання цілого ряду проблем в галузі матеріалознавства. Однією з таких актуальних проблем є комплекс питань, пов'язаних з термічною обробкою деталей машин.

Термічна обробка — найпоширеніший у сучасній техніці спосіб зміни властивостей металів і сплавів. Саме термічна обробка призначена забезпечити високу якість металу виробів. Термічною обробкою можна значно покращити механічні, технологічні та експлуатаційні властивості конструкційних металів та їх сплавів. В багатьох випадках параметрами термічної обробки можна змінити властивості конструкційних матеріалів на протилежні.

Сучасна теорія термічної обробки деталей повною мірою використовується у наукових дослідженнях та при виготовленні різноманітних виробів новітньої техніки (космічної, реактивної, ядерної). Однак загальний технічний прогрес в ХХІ столітті вимагає застосування досягнень сучасної теорії термічної обробки деталей і в більш приземних виробництвах — металургійному, ливарному, машинобудівному, теплоенергетичному, зварювальному та інших.

Отже, необхідність урахування оптимальних параметрів термічної обробки деталей при виготовленні виробів очевидна як в навчальному процесі, так і практичному плані. Однак впровадження основ термічної обробки деталей у навчальний процес стримується недостатньою підготовкою майбутніх фахівців, що пов'язано з відсутністю відповідної навчальної літератури.

Навчальний посібник “Термічна обробка деталей машин” направлений на розв’язання цієї проблеми. У навчальному посібнику викладені основні положення термічної обробки деталей і заготовок; розглянуті структурні та фазові перетворення в матеріалі при його нагріванні та охолодженні, приведені обґрунтування на вибір параметрів термічної обробки, розглянута технологія поверхневого гартування та хіміко-термічної обробки деталей. Приведені конструкції сучасного термічного обладнання та рекомендації по використанню надають можливість підібрати оптимальні умови для термічної обробки деталей.

Використання даного посібника в навчальному процесі сприятиме підвищенню якості підготовки молодих інженерів-термістів механічних спеціальностей, що безумовно відзначиться на якісних показниках продукції відповідних виробництв.

При складанні навчального посібника широко використовувався досвід та методологічні розробки матеріалознавчих кафедр вищих навчальних закладів: Дніпропетровської Національної металургійної академії, Донбаської державної машинобудівної академії, Керченського державного морського технологічного університету, Криворізького технічного університету, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та інших.

Автор висловлює глибоку вдячність лауреату Державної премії України, провідному науковому співробітнику ІЧМ НАН України, доктору технічних наук — В.О. Носкову, доктору технічних наук, професору Дніпропетровського Національного гірничого університету — Р.П. Дідику, професору ХНАДУ — В.І. Мощенку, доценту ДДМБА — О.М. Мінкову, доцентам КДМТУ — Ю.В. Карнаушенко, О.Д. Сушкову, доценту КТУ — О.В. Чернявській за конкретні пропозиції, зауваження і щирі побажання при підготовці до написання даного навчального посібника.

## ГЛАВА 1

### ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

*Термообробкою* називається технологічний процес обробки виробів із металів та їх сплавів тепловим впливом із метою зміни їх структури та властивостей в заданому напрямку.

*Термообробка* є сукупністю операцій нагрівання, витримки й охолодження металів та їх сплавів, які здійснюються в певній послідовності.

#### 1.1. Температура й час

Мета будь-якого процесу термічної обробки полягає в тому, щоб нагріванням до певної температури й наступним охолодженням викликати бажану зміну будови металу.

Основними факторами впливу при термічній обробці є температура й час, тому режим будь-якої термічної обробки можна представити графіком у координатах  $t$  (температура) —  $\tau$  (час) (рис. 1.1).

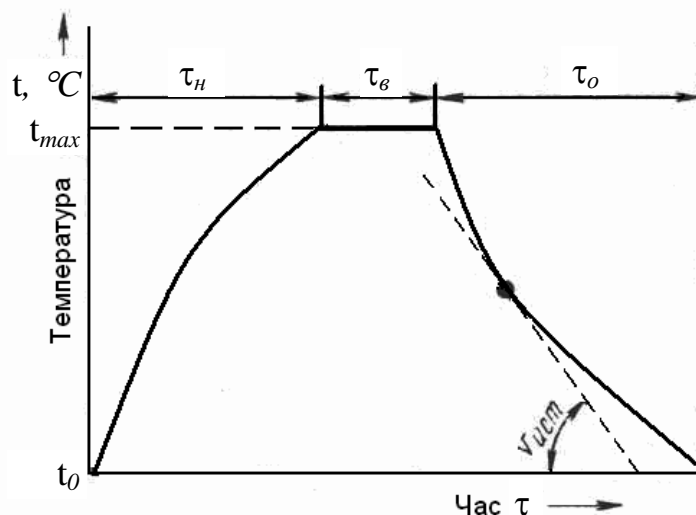


Рис. 1.1. Графік простої термічної обробки

Режими термічної обробки характеризують наступні основні параметри: температура нагрівання —  $t_{\max}$ ; час витримки сплаву при температурі нагрівання —  $\tau_{\text{в}}$ ; швидкість нагрівання —  $v_{\text{нагр}}$  і швидкість охолодження —  $v_{\text{дійсн}}$

## 1.2. Перетворення при нагріванні та охолодженні сталі

Відповідно до діаграми стану залізо-вуглець при повільному нагріванні сплавів до температури  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  відбувається перетворення перліту на аустеніт (рис. 1.2).

Розглянемо це перетворення детальніше в евтектоїдній сталі, що містить  $0,8\text{ \% C}$ .

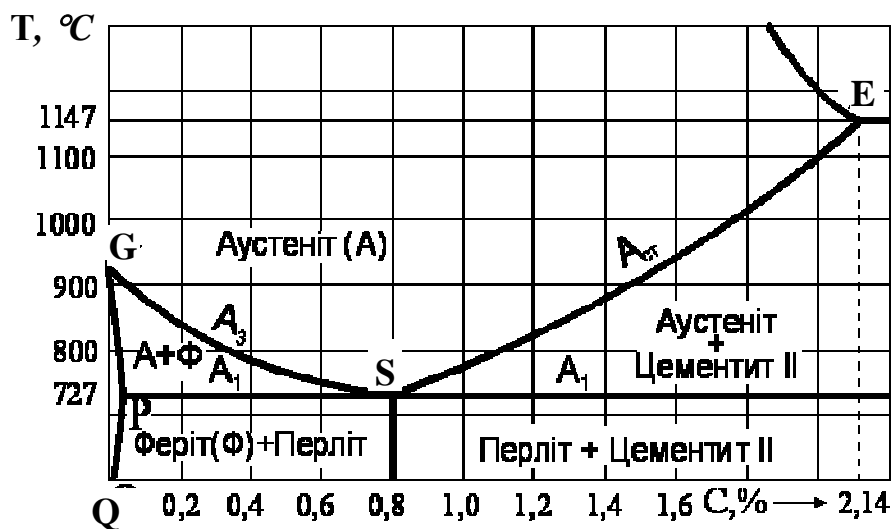


Рис. 1.2. Частина діаграми стану залізо-вуглець

### 1.2.1. Фазові перетворення в сталі при нагріванні

Процес перетворення починається з утворення зародків аустеніту на межі поділу ферит-цементит і наступного їх росту. Оскільки ця межа має велику протяжність, у ній виникає велика

кількість зародків. Утворення зародків якраз на межі фериту та цементиту полегшується тим, що в нові кристалічні грати надходить вуглець із цементитних пластинок.

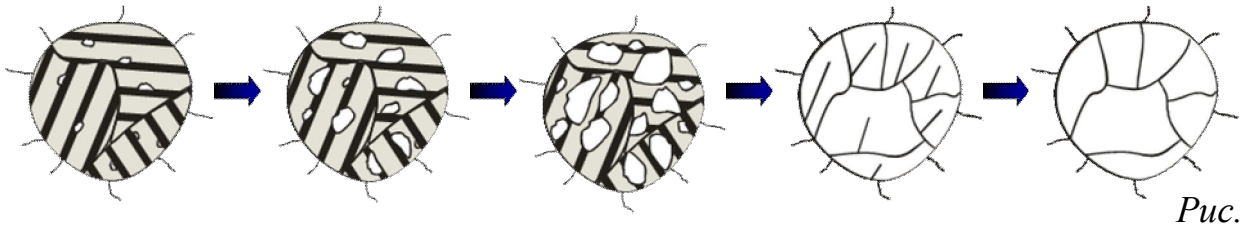


Рис.

1.3. Схема перетворення перліту на аустеніт

Ріст зерна аустеніту відбувається завдяки розчиненню пластинок цементиту й алотропному перетворенню фериту. Процес перетворення розвивається зростанням уже утворених кристалів аустеніту і зародженням нових (рис. 1.3).

Оскільки в кожному перлітному зерні виникає кілька зародків аустеніту, перетворення супроводжується подрібненням зерна. Цю важливу особливість використовують у практиці термообробки сталі.

Перетворення відбувається в інтервалі температур, і його швидкість суттєво залежить від температури, причому з її підвищенням воно прискорюється. Чим швидше нагрівається сталь, тим при вищих температурах це перетворення починається і закінчується (промені  $V_1$  та  $V_2$  на рис. 1.4).

Швидкість перетворення перліту на аустеніт залежить також від ступеня дисперсності перліту і його форми. Чим дрібніші часточки цементиту, тим більша їхня міжфазна поверхня і тим швидше відбувається перетворення. Повільніше воно проходить у сталі з зернистим перлітом.

Із підвищенням швидкості нагрівання і ступеня дисперсності перліту росте кількість зародків аустеніту. Тому при дуже великих швидкостях нагрівання, наприклад при нагріванні сталі



струмом високої частоти (СВЧ), можна отримати надзвичайно дрібні аустенітні зерна.

При термообробці сталі в умовах безперервного нагрівання перетворення перліту на аустеніт затримується. Чим швидше нагрівається сталь, тим при вищих температурах це перетворення починається і закінчується.

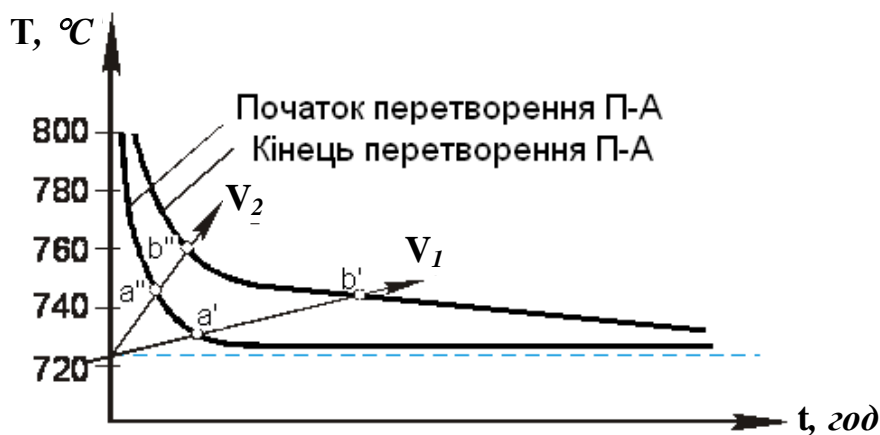


Рис. 1.4. Діаграма ізотермічного перетворення перліту на аустеніт

На рис. 1.4 променями  $V_1$  та  $V_2$  позначено дві швидкості нагрівання сталі. При нагріванні зі швидкістю  $V_2$  перетворення починаються при температурі, що відповідає точці  $a''$ , і закінчуються при температурі, яка відповідає точці  $b''$ . При нагріванні з меншою швидкістю  $V_1$  перетворення починаються та закінчуються при нижчих температурах, що відповідає точкам  $a'$  і  $b'$ . Тільки при дуже повільному підвищенні температури, близькому до умов рівноваги, перетворення починаються та закінчуються практично при температурі  $A_1$ .

Закінчується процес утворенням аустеніту і зникненням перліту. Проте утворений аустеніт неоднорідний за вуглецем навіть в об'ємі одного зерна. В тих місцях, де раніше були часточки цементиту, вміст вуглецю значно вищий, ніж у місцях, де були часточки фериту.

Для отримання однорідного (гомогенного) аустеніту потрібен додатковий час витримки у зоні температур вище  $A_{c1}$  для завершення дифузійних процесів, пов'язаних з вирівнюванням концентрації вуглецю.

### 1.2.2. Фазові перетворення в сталі при охолодженні.

#### С-подібна діаграма

Для отримання необхідної структури та властивостей в сталі при термообробці вирішальна роль належить охолодженню її з аустенітного стану. Таке перетворення може відбуватись або при сталій температурі (ізотермічно), або при безперервному охолодженні. Залежно від температури ізотермічної витримки чи швидкості охолодження аустеніту утворюються різні продукти його розпаду, чим і визначаються властивості сталі. Для розуміння закономірностей перетворення аустеніту важливо простежити цей процес при сталій температурі.

При охолодженні сталі нижче критичної точки  $A_1$  має бути перетворення аустеніту на перліт (аустеніт та перліт знаходяться в рівновазі). Для стійкого проходження процесу перетворення потрібне переохолодження аустеніту, тобто зниження температури сталі відносно зазначеної критичної точки  $A_1$ .

Якщо аустеніт різко переохолодити до температури трохи нижче точки  $A_1$ , то протягом певного часу перетворення на перліт не розпочнеться. Цей проміжок часу називається *інкубаційним періодом*.

На рис. 1.5, а зображено серію експериментальних кривих, що характеризують процес розпаду аустеніту евтектоїдної сталі при різних температурах ізотермічної витримки. За ними можна встановити час до початку і кінця розпаду аустеніту при кожній

температурі. Ці значення часу відкладають на горизонтальних лініях, які відповідають температурам ізотермічних витримок, й утворені точки з'єднують плавними кривими (рис. 1.5, б).

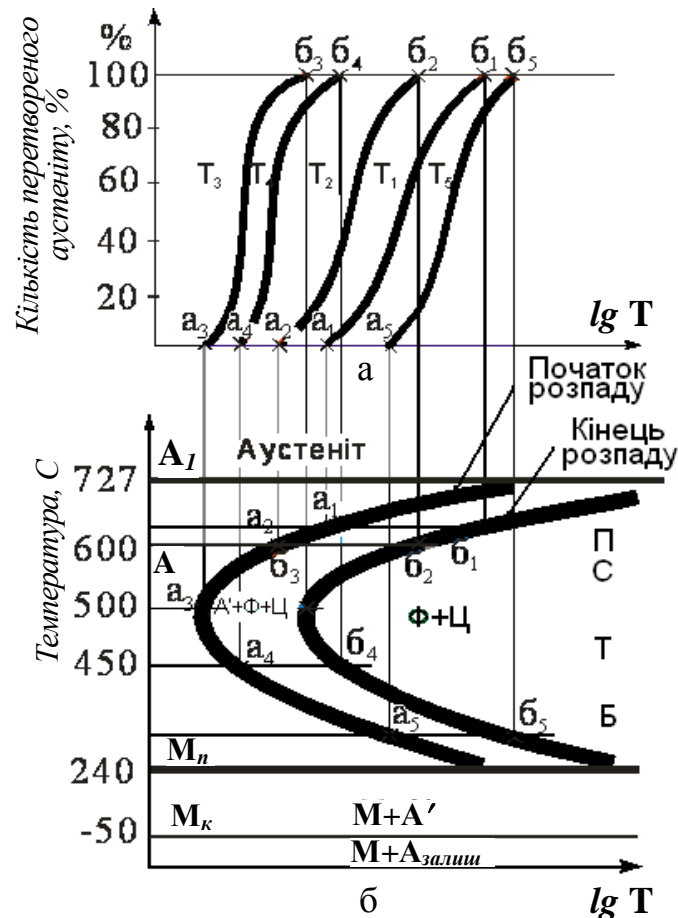


Рис. 1.5. Схема побудови діаграми ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі

Ліва крива показує час до початку перетворення переохолодженого аустеніту, тобто значення інкубаційного періоду, а права — час закінчення перетворення залежно від ступеня переохолодження сталі. По горизонтальній осі часу застосовано логарифмічний масштаб, що дає змогу на одному графіку відкласти малі та дуже великі проміжки часу. Область лівіше першої кривої відповідає переохолодженому аустеніту ( $A'$ ), область між кривими — переохолодженому аустеніту та продуктам його розпаду, а об-

ласть правіше другої кривої — продуктам розпаду переохолодженого аустеніту.

Отримана залежність називається *діаграмою ізотермічного перетворення аустеніту*, або *C-подібною діаграмою* (через подібність кривих на літеру C). З діаграми випливає, що при збільшенні ступеня переохолодження значення інкубаційного періоду і час завершення розпаду аустеніту спочатку зменшуються, досягаючи мінімального значення, після чого знову збільшуються. Найменшу стійкість аустеніт має при температурах близько 550 °С. Для евтектоїдної сталі її протяжність становить близько 1 с, тоді як стійкість аустеніту при 700 °С досягає 10 с, а при 300 °С — близько 1 хв.

Ізотермічне перетворення аустеніту відбувається в інтервалі температур  $M_{\text{п}}—M_{\text{к}}$ , де  $M_{\text{п}}$  — температура початку,  $M_{\text{к}}$  — температура кінцева бездифузійного перетворення аустеніту на новий вид структури — мартенсит. Продуктами ізотермічного перетворення аустеніту є феритно-цементитні суміші різного ступеня дисперсності. Перетворення при температурах  $A_1 — 550$  °С називається *перлітним*, а при температурах 250 °С —  $M_{\text{п}}$  — *проміжним*.

### 1.2.3. Перлітне та проміжне перетворення аустеніту

Перетворення аустеніту на перліт — кристалізаційний процес, що супроводжується дифузією вуглецю. Процес перетворення відбувається зародженням і спільним ростом кристалів фериту та цементиту.

Розпад аустеніту починається з зародження кристалу цементиту (рис. 1.6). Цементит виникає в тих місцях, де внаслідок дифузії випадково відбулось збагачення аустеніту вуглецем до концентрації 6,67 %, порівнюючи з середньою концентрацією 0,8 %.

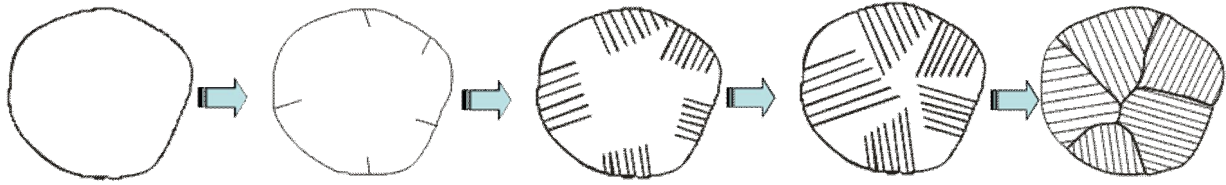


Рис. 1.6. Схема перетворення аустеніту на перліт

Такими місцями можуть бути дефекти в кристалічних ґратах аустеніту, які найчастіше скупчуються на межах зерен. Тому в одному аустенітному зерні може виникнути кілька зародків цементиту. При підростанні пластинок фериту вуглець відтісняється у прилеглі ділянки аустеніту, що сприяє виникненню та росту нових кристалів цементиту. Чергування процесів зародження і росту пластинок цементиту та фериту сприяє утворенню перлітних колоній і поступовому їх змиканню. На місці колишнього аустенітного зерна утворюється кілька дрібних зерен перліту.

Структури продуктів ізотермічного перетворення аустеніту в перлітній області залежно від ступеня дисперсності умовно поділяються на три групи. При невеликих ступенях переохолодження ( $700\dots650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) утворюється порівняно груба суміш фериту і цементиту — *перліт* (П); при переохолодженні до  $650\dots600\text{ }^{\circ}\text{C}$  — більш дрібна, ніж перліт, феритно-цементитна суміш, яка називається *сорбітом* (С); при температурах  $600\dots550\text{ }^{\circ}\text{C}$  — дуже тонка суміш кристалів фериту і цементиту — *троостит* (Т).

Проміжне перетворення сталі при більш низьких температурах ( $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  —  $M_{\text{п}}$ ) проходить в умовах, коли дифузія атомів заліза дуже сповільнена, а вуглець ще зберігає достатню рухливість. Воно має змішаний характер — дифузійний та бездифузійний.

Процес перетворення починається з дифузійного перерозподілу вуглецю в аустеніті, внаслідок чого одні об'єми його збіднюються, а інші — збагачуються вуглецем. Збіднені вуглецем

об'єми аустеніту зазнають бездифузійного (алотропічного) перетворення грат  $\gamma$  на грати  $\alpha$ . Через малу швидкість дифузії вуглець не встигає залишити грати  $\gamma$ -заліза до алотропічного перетворення, тому утворений ферит пересичений вуглецем. Утворений ферит може містити 0,1...0,2 % С проти 0,001...0,02 % С у фериті перліту. Такий ферит нестійкий із часом розпадається на феритно-цементитну суміш.

В об'ємах аустеніту, збагачених вуглецем, виділяються часточки цементиту, й у міру збіднення залишків цього аустеніту вуглецем відбувається бездифузійне перетворення його на пересичений твердий розчин  $\alpha$ .

Внаслідок проміжного перетворення аустеніту в інтервалі температур 550 °С —  $M_n$  утворюються структури, що складаються із суміші надто дрібних зерен трохи перенасиченого вуглецем фериту і цементиту, які називаються *бейнітом* (Б). Бейніт, що утворився при температурі 550...400 °С, називається *верхнім* і має пір'яну будову. Бейніт, який утворився при нижчій температурі, називається *нижнім* і має голчату будову.

З підвищенням дисперсності феритно-цементитних сумішей зростають твердість і міцність сталі. Так, евтектоїдна вуглецева сталь із перлітною структурою має твердість 180...240 НВ, із сорбітною — 250...350 НВ, із трооститною — 400...450 НВ. Твердість бейніту досягає значень близько 500 НВ.

Пластичність й ударна в'язкість сталі зі зниженням температури ізотермічного перетворення спочатку підвищуються, а потім починають спадати. Найкращу комбінацію міцності, пластичності та в'язкості має структура сорбіту.

Ізотермічне перетворення в до- й заевтектоїдних сталях відрізняється від розглянутого тим, що утворенню перліту передують виділення з аустеніту надмірних кристалів фериту чи цементиту. Вони виділяються тільки при невеликих ступенях переохоло-

дження сталі, що відмічається додатковими лініями на  $C$ -подібних кривих (рис. 1.7).

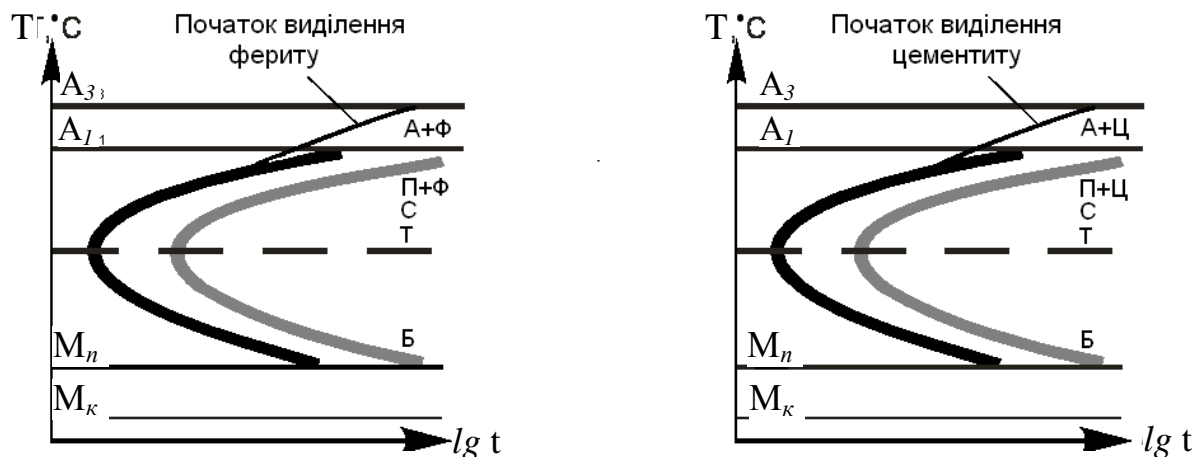


Рис. 1.7. Діаграми ізотермічного перетворення в доєвтектоїдній та заєвтектоїдній сталях

Проміжне перетворення аустеніту в цих сталях відбувається без попереднього виділення надмірних фаз. Тому вміст вуглецю у створеній феритно-цементитній суміші буде відрізнятися від евтектоїдного.

#### 1.2.4. Мартенситне перетворення

Мартенсит являє собою пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі. Ця структурна складова має значну твердість (до 65 HRC) і надто крихка. Висока твердість мартенситу пояснюється його будовою: дуже розвинена суббудова мартенситних пластин. Твердість його зі збільшенням вмісту вуглецю до 0,6...0,8 % спочатку зростає, а потім залишається постійною аж до 1,1 % C (рис. 1.8).

Перетворення аустеніту в мартенсит може відбуватися тільки бездифузійним шляхом — однаковим переміщенням (зрушен-

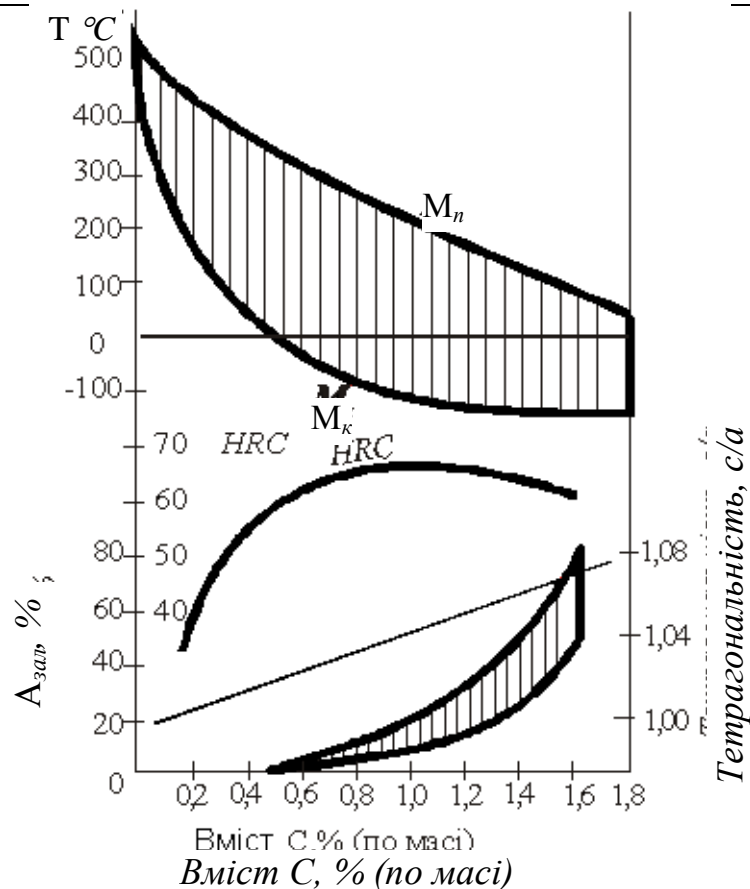


Рис. 1.8. Вплив вуглецю на тетрагональність, твердість, температури початку ( $M_n$ ) і закінчення ( $M_s$ ) мартенситного перетворення та кількість залишкового аустеніту ( $A_{зал}$ ) у загартованій сталі

ням) атомів в одній або декількох суміжних кристалографічних площинах, причому величина зсуву кожного атома не перевищує міжатомної відстані. Перебудова  $\gamma$ -заліза в  $\alpha$ -залізо відбувається без зміни хімічного складу, тобто атоми вуглецю, розчинені в ГЦК ґратах, не встигають її залишити й "затримуються" між вузлами ОЦК ґрат. Середньовуглецеві сталі із вмістом вуглецю 0,4 % і більше, а також леговані містять від 3 до 12 % залишкового аустеніту, а швидкорізальні — 35 % і навіть більше. При вмісті вуглецю більше 0,4 % частина мартенситного перетворення розповсюджується на зону від'ємних температур. Це пояснюється тим, що багато сталей мають мартенситний інтервал  $M_n$ — $M_s$  (рис. 1.8), який простягається в зоні температур нижче 0 °С, і при



безперервному охолодженні в охолодниках мартенситне перетворення під час гартування сталі не завершується при досягненні кімнатних температур.

Під час гартування сталі з її охолодженням до цієї температури утворюється метастабільна структура сталі з великою кількістю залишкового аустеніту. Наявність у загартованих деталях залишкового аустеніту погіршує їх якість: зменшуються твердість і міцність сталі, змінюються розміри деталей та інструментів у разі поступового спонтанного розпаду залишкового аустеніту при кімнатній температурі.

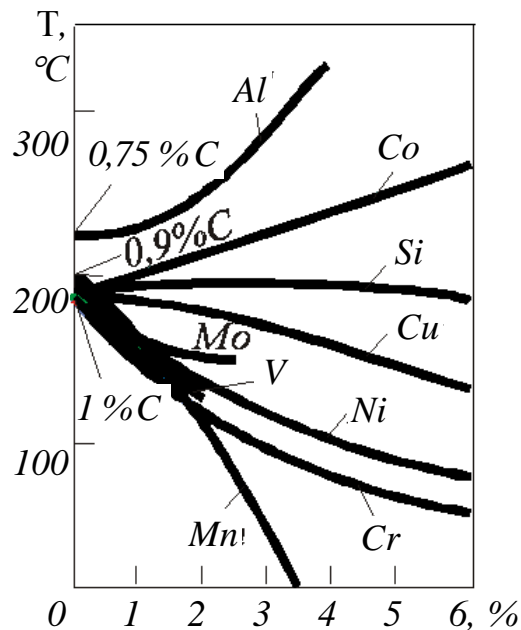


Рис. 1.9. Залежність температури початку мартенситного перетворення від вмісту легованих елементів

У легованих сталях перетворення аустеніту має деяку відмінність. Легування легуючими елементами (крім кобальту) змінює криві розпаду аустеніту (рис. 1.9).

Проміжне (бейнітне) перетворення може протікати швидко, тому що дифузія легуючих елементів при цих температурах

практично виключається і склад вихідного аустеніту, що утвориться при проміжному перетворенні залишиться той самий.

По діаграмах ізотермічного розпаду аустеніту можна проаналізувати процеси фазових перетворень, що відбуваються при безперервному охолодженні.

Стійкість аустеніту особливо сильно підвищується при одночасному легуванні сталі декількома елементами.

### **1.3. Обробка холодом**

Обробка сталі холодом, або термообробка при низьких температурах, полягає в охолодженні загартованих деталей до температури, нижчої від 0 °С. Вона призначається для перетворення залишкового аустеніту загартованої сталі на мартенсит під впливом низьких температур. Як правило, обробляють холодом деталі із сталі, в яких після гартування у структурі є залишковий аустеніт. Обробка сталі холодом виконується відразу після її гартування.

Послідовність термообробки сталевих деталей холодом:

- гартування деталі за нормальним режимом з наступним охолодженням до кімнатної температури;
- обробка холодом у середовищі з температурою від –20 до –196 °С;
- витримка при низькій температурі до вирівнювання її по всьому перерізу деталі;
- виведення деталі з охолодного обладнання з витримкою на повітрі до температури навколишнього середовища;
- низький відпуск сталі.

Для отримання позитивних результатів слід домагатися найповнішого охолодження деталей і завантажувати їх у середо-

вище з низькою температурою тільки після охолодження до температури зовнішнього середовища. Режимні параметри обробки виробів холодом вимагають:

- точного визначення місця її виконання в загальному технологічному процесі термообробки;
- обґрунтування доцільності операцій термообробки зі змінною режиму, зумовлених застосуванням охолодження нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- зазначення температури охолодження виробу для його обробки, тривалості витримки при мінусовій температурі та швидкості охолодження.

На рис. 1.10 указана послідовність операцій термообробки інструментів з використанням охолодження нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і зазначенням орієнтовних режимних параметрів.

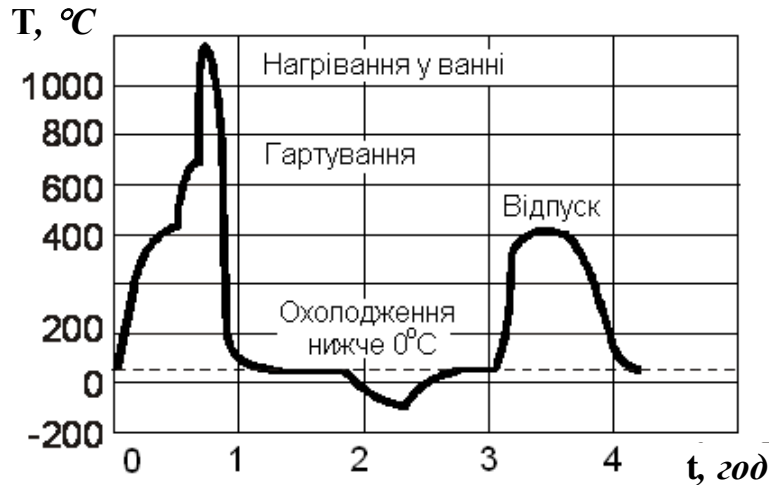


Рис. 1.10. Послідовність операцій термообробки

Рекомендована така послідовність операцій:

- гартування;
- охолодження нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- відпуск.

Тривалість витримки виробів у середовищі з мінусовими температурами визначається часом, потрібним для проморожування їх до встановленої температури по всьому перерізу виробу, з подальшою витримкою при встановленій температурі 1...2 год.

## 1.4. Вплив легуючих елементів на С-подібну діаграму

### 1.4.1. Вплив легуючих елементів на температури фазових перетворень

Спеціально введені легуючі елементи (найчастіше — метали) змінюють температури фазових перетворень у вуглецевих сталях і взаємодіють з вуглецем, залізом та між собою. Внаслідок цього у структурі сталей з'являються нові фазові складові, що змінюють їхні властивості. Введення легуючих елементів значно розширює також можливості термообробки для отримання комплексу властивостей сталей.

Зміна температур фазових перетворень у легованих сталях насамперед пов'язана з впливом легуючих елементів на алотропні форми заліза. Всі елементи, що розчиняються в залізі, змінюють температурний інтервал існування його алотропних модифікацій, тобто зміщують критичні точки  $A_3$  й  $A_4$ .

За характером впливу на алотропні перетворення заліза легуючі елементи можна поділити на *дві групи*.

*Елементи першої групи* (нікель, манган, мідь, кобальт, вуглець, азот та ін.) розширюють межі стійкого стану аустеніту. Вони підвищують температуру, що відповідає точці  $A_4$ , і знижують температуру, яка відповідає точці  $A_3$ .

На рис. 1.11 показано типові схеми діаграм стану заліза з такими елементами. По осі абсцис відкладено вміст *c*-легуючого елемента.

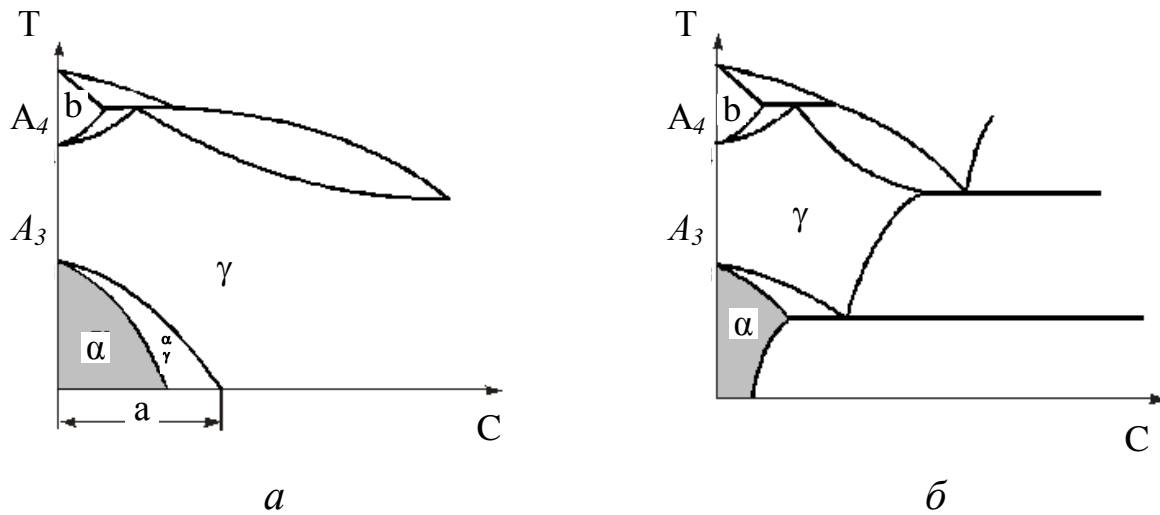


Рис. 1.11. Типова діаграма стану заліза з легуючими елементами першої групи

У сплавах заліза з манганом, нікелем, кобальтом область існування гомогенного — твердого розчину «відкривається» (рис. 1.11, *a*), тобто в певному інтервалі температур існує необмежена розчинність компонентів один в одному у твердому стані з утворенням твердих розчинів з гранецентрованими ґратами. При концентрації легуючого елемента, що дорівнює чи перевищує *a*, аустеніт стійкий при кімнатній і більш низьких температурах. Такі сплави називаються *аустенітними*.

*Елементи другої групи* (хром, ванадій, молібден, вольфрам, кремній, алюміній, титан та ін.) підвищують температуру, яка відповідає точці  $A_3$ , і знижують температуру, що відповідає точці  $A_4$  (рис. 1.12). По осі абсцис, як і на рис. 1.11, відкладається вміст *c*-легуючого елемента. Тоді область стійкого стану аустеніту звужується, а розширюється область стійкого стану фериту. При деякому вмісті легуючого елемента, що дорівнює *b*, температури,

які відповідають точкам  $A_3$  та  $A_4$ , збігаються — відбувається «замикання»  $\gamma$ -області на діаграмі стану. За необмеженої розчинності легуючого елемента (хром, ванадій) в залізі область існування фериту відкривається (рис. 1.12, *a*).

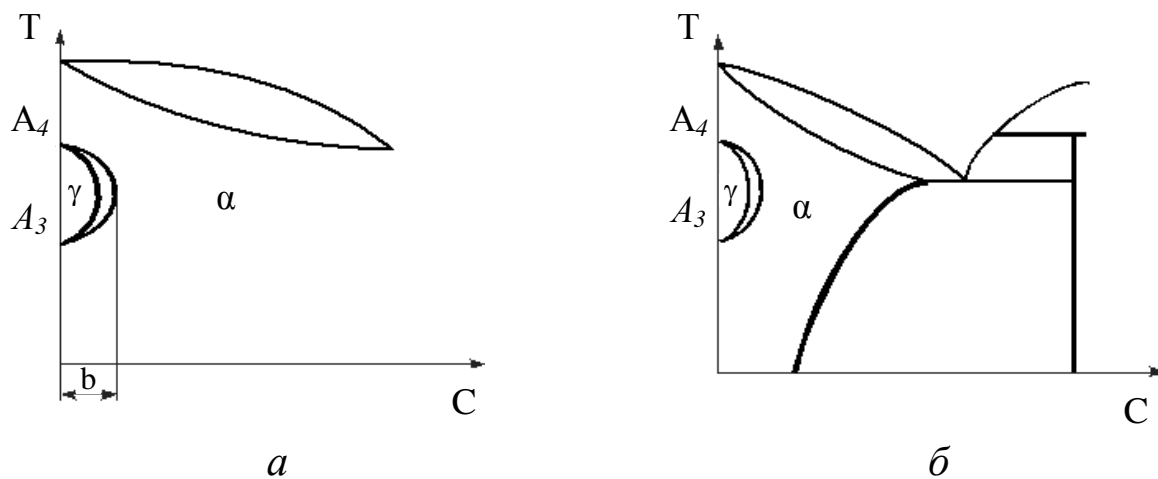


Рис. 1.12. Типова діаграма стану заліза з легуючими елементами другої групи

Однофазні сплави, що містять легуючого елемента більше, ніж  $b$ , називаються *феритними*.

#### 1.4.2. Структурні складові та властивості легованих сталей

Зміцнення фериту зростає при збільшенні вмісту розчиненого в ньому легуючого елемента  $c$  (рис. 1.13, *a*).

Ще більший ефект зміцнення легованого фериту можна дістати після його термообробки. Так, легований хромом, манганом або нікелем безвуглецевий аустеніт при швидкому охолодженні перетворюється на мартенсит з типовою голчатою будовою. Твердість його досягає 350 НВ. Проте практично всі легуючі елементи (за винятком нікелю і частково хрому) знижують пластичність

й ударну в'язкість фериту (рис. 1.13, б), де по осі абсцис відкладено вміст  $c$ -легуючого елемента.

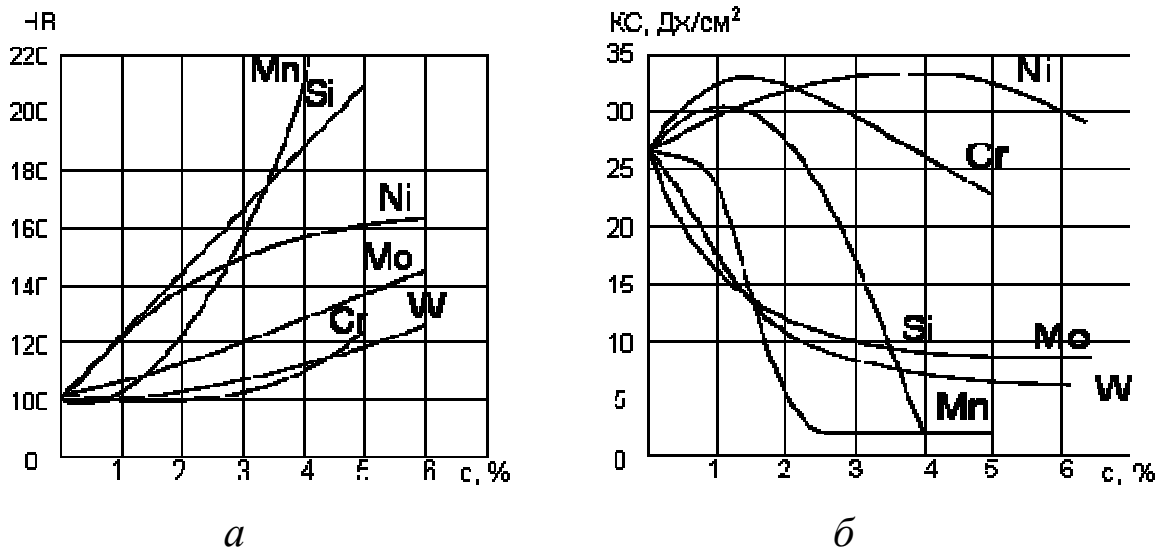


Рис. 1.13. Вплив легуючих елементів на твердість і ударну в'язкість

### 1.4.3. Перлітне та проміжне перетворення в легованих сталях

Легуючі елементи суттєво впливають на кінетику (від грец. *kinitikos* — надавати руху) і характер перетворення аустеніту. Це пов'язано з дією кількох факторів, які можуть впливати на цей процес спільно чи окремо: утворення нових фаз, зниження швидкості  $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення, мала швидкість дифузії легуючих елементів, зниження швидкості дифузії вуглецю у присутності легуючих елементів тощо. У зв'язку з цим у легованих сталях змінюється вигляд діаграм ізотермічного перетворення аустеніту.

При легуванні сталі невеликою кількістю некарбідотвірних елементів (Ni, Si) і манганом криві ізотермічного перетворення зберігають ту саму форму, що й для вуглецевих сталей. Проте

стійкість легованого аустеніту зростає, тому *C*-криві зміщуються праворуч (рис. 1.14, *a*).

Швидкості перлітного та проміжного перетворень сталі залежать від вмісту вуглецю в ній. При малому вмісті вуглецю в легованому карбідотвірними елементами аустеніті проміжні перетворення відбуваються швидше, ніж перлітне (рис. 1.14, *б*).

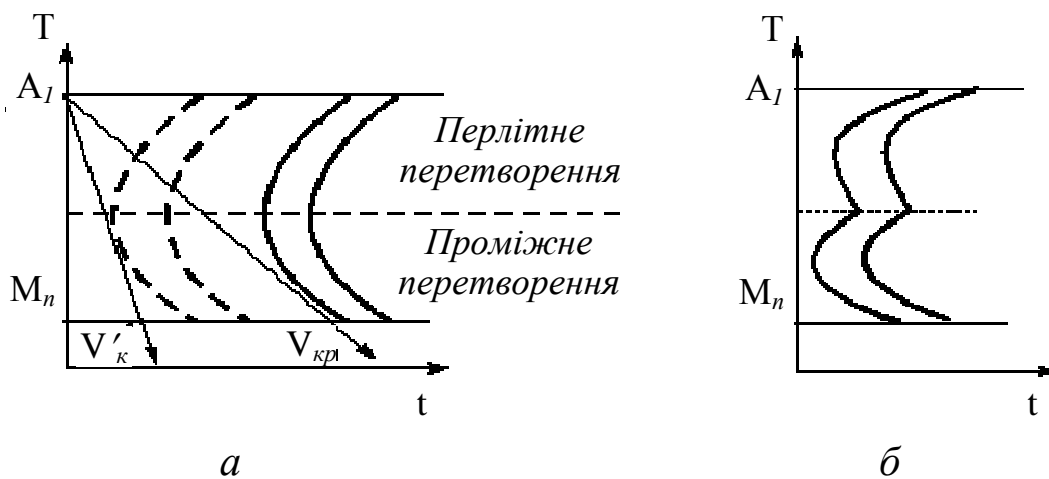


Рис. 1.14. Діаграми стану легованих сталей невеликою кількістю некарбідотвірних (*a*) та карбідотвірних (*б*) елементів

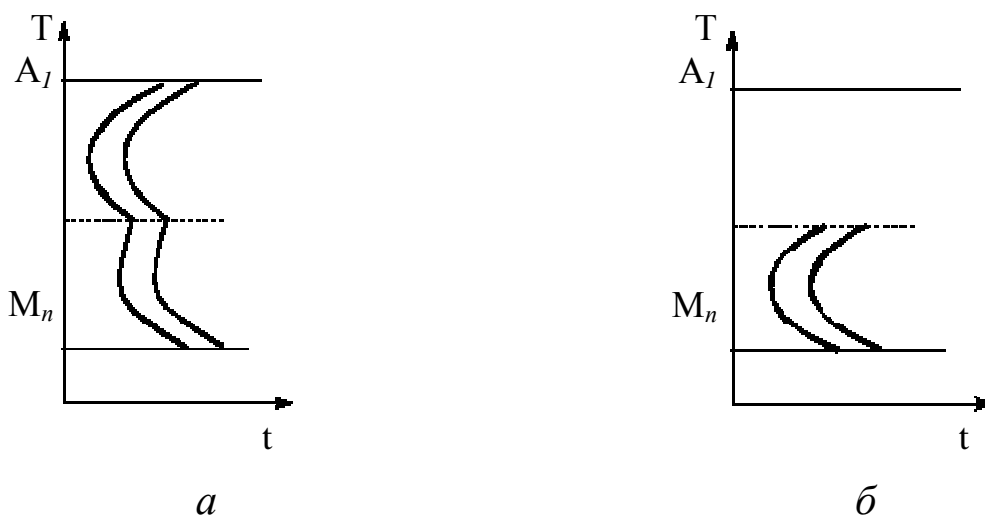


Рис. 1.15. Діаграми стану складнолегованих сталей при значному вмісті вуглецю (*a*) та при високому вмісті некарбідотвірних елементів (*б*)



При значному вмісті вуглецю в легованій сталі швидкість утворення продуктів проміжного перетворення значно менша, ніж швидкість перлітного перетворення, і діаграма набуває вигляду, зображеного на рис. 1.15, *а*.

З достатньою для практики точністю положення точки мартенситного перетворення  $M_n$  для сталей з середнім вмістом вуглецю можна визначити за формулою:

$$M_n = 520 - 320 C - 45 Mn - 30 Cr - 20 Ni + Mo + Cu - 5 Si,$$

де  $C, Mn, Cr, Ni, Mo, Cu, Si$  — вміст легуючих елементів, %.

У складнолегованих сталях при високому вмісті некарбідотвірних елементів і низькому вмісті вуглецю перлітне перетворення може бути подавленим (рис. 1.15, *б*). Про такі сталі говорять, що вони не відпалюються.

У високо-хромистих корозійностійких сталях з невеликим вмістом вуглецю, навпаки, подавляється проміжне перетворення (рис. 1.16, *а*).

Якщо сталь має аустенітну структуру при будь-яких температурах і не зазнає  $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення, то С-подібна діаграма її містить чисте поле (рис. 1.16, *б*).

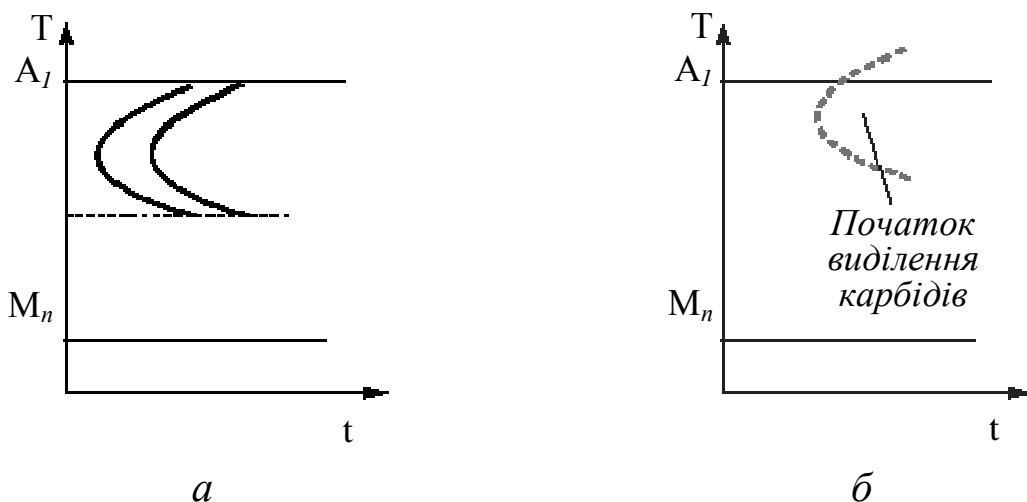


Рис. 1.16. Діаграми стану високо-хромистих корозійностійких сталей (а) та легованих сталей, що мають аустенітну структуру (б)

Вплив легуючих елементів на кінетику перетворення аустеніту та будову продуктів, які утворилися, дуже різноманітний. Остання змінюється в широких межах залежно від кількості і стану легуючих елементів та вуглецю в сталі. При легуванні сталі невеликою кількістю некарбідотвірних елементів (Ni, Si) і манганом криві ізотермічного перетворення зберігають ту саму форму, що й для вуглецевих сталей. Стійкість легованого аустеніту зростає, і С-криві зміщуються праворуч (рис. 1.14, *a*).

У сталях, легованих переважно карбідотвірними елементами (Cr, W, V, Mo), перлітне та проміжне перетворення розділяються інтервалом підвищеної стійкості аустеніту (рис. 1.14, *б*, 1.15, *a*).

На діаграмі ізотермічного розпаду з'являються два максимуми. Це є характерною ознакою легованих сталей.

Розглянуті перетворення в легованій сталі відбуваються згідно з С-діаграмами за умови, що легуючі елементи повністю розчинені в аустеніті. Нерозчинені карбіди здатні зв'язати значну частину легуючих елементів і можуть служити готовими центрами кристалізації при подальших перетвореннях аустеніту, стійкість якого може зменшитись. В цьому напрямку діє також хімічна неоднорідність аустеніту, зумовлена, наприклад, прискореним нагріванням сталі. Ці особливості необхідно враховувати при визначенні режимних параметрів термообробки легованих сталей.

## ГЛАВА 2

### ОСНОВНІ ВИДИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

#### 2.1. Можливості зміцнювальної термічної обробки сталі

*Термообробкою* називається технологічний процес обробки виробів із металів та їх сплавів тепловим впливом. Цей вплив може поєднуватися із хімічним, деформаційним, магнітним та іншими діями. У сплаві з малими твердістю і міцністю після термообробки можуть підвищитися ці характеристики, і навпаки, твердий сплав, що важко обробляється, може стати м'яким та пластичним і буде легко оброблятися. Підвищуючи міцність сплаву термообробкою, можна зменшити розміри та масу деталей і відповідно знизити матеріаломісткість виробництва при збереженні експлуатаційної надійності та довговічності машин і конструкцій. Під впливом термообробки змінюються також хімічні та фізичні властивості металів і сплавів. Так, сталь може стати магнітною чи немагнітною, може підвищитись або знизитись її корозійна стійкість, тощо.

*Термообробка* є сукупністю операцій нагрівання, витримки й охолодження металів та їх сплавів, які здійснюються в певній послідовності. Нагрівання, а іноді й весь процес термообробки здійснюють на термічному обладнанні (печах).

Принципову можливість застосування того чи іншого виду термообробки металів та їх сплавів визначають за діаграмою стану. У зв'язку з цим можна виділити такі основні групи металевих сплавів:

- сплави, що не мають фазових перетворень у твердому стані;
- сплави зі змінною розчинністю компонентів у твердому стані;
- сплави з евтектоїдним перетворенням.

Класифікація видів термообробки металів та їх сплавів ґрунтується на тому, якого типу структурні зміни відбуваються в них при тепловому впливі.

Розрізняють чотири види термообробки матеріалів.

I. Відпал металів та їх сплавів при температурах, за яких не відбувається фазових перетворень у твердому стані матеріалу. Така термообробка називається *відпалом першого роду*.

II. Відпал металів, а також їх сплавів, що мають фазові перетворення в твердому стані. Така термообробка називається *відпалом другого роду*.

III. *Гартування металів* та їх сплавів, що мають фазові перетворення в твердому стані, змінну з температурою розчинність компонентів, розпад високотемпературного розчину з утворенням евтектоїду та ін.

IV. *Відпуск* — вторинне нагрівання металів та їх сплавів, що наближає їхню структуру до стійкого (рівноважного) стану.

Процес будь-якої термообробки матеріалу обов'язково складається з трьох послідовних етапів:

- нагрівання;
- витримка при заданій температурі;
- охолодження.

Перший етап характеризується швидкістю нагрівання і максимальною температурою, до якої нагрівають виріб. Другий і третій етапи — відповідно тривалістю витримки та швидкістю охолодження виробу. Знання параметрів процесу визначає режим певної термообробки. Числові значення цих параметрів, вибрані для певної термообробки конкретного виробу і виражені у відповідних одиницях, фіксуються в технологічній карті процесу.

## 2.2. Основні види відпалу та їх призначення. Нормалізація

### 2.2.1. Види відпалу

Відпал сталі проводять для усунення дефектів її структури, що з'явилися у процесі лиття, кування та інших технологічних операцій. Здебільшого відпал застосовують як підготовчу термообробку (наприклад, для поліпшення оброблюваності металів різанням), але іноді він може бути й остаточною термообробкою.

Основна мета відпалу: отримання рівноважної структури сталі та зняття напружень. Після відпалу сталь набуває малої твердості, помірної міцності, високої пластичності та в'язкості.

Розрізняють такі види відпалу сталі:

- дифузійний (гомогенізуючий);
- повний;
- неповний (пом'якшувальний, циклічний, на зернистий перліт);
- рекристалізаційний;
- ізотермічний;
- відпал для зняття внутрішніх напружень.

Відповідний вид відпалу призначають залежно від того, які відхилення від рівноважного стану потрібно усунути. Температурні інтервали нагрівання вуглецевих сталей для цих видів термообробки показано на рис. 2.1—2.4.

### 2.2.2. Дифузійний відпал

*Дифузійний відпал* (гомогенізація) полягає в нагріванні сталі до температури на 150...250 °С нижче лінії солідуса, тривалій витримці (8...20 год) при цій температурі, повільному охолодженні в печі до певної температури (200...250 °С), а потім на повітрі.

Дифузійному відпалу підлягають зливки і великі сталеві виливки з метою усунення нерівномірного розподілу компонентів сплаву між зернами й усередині їх.

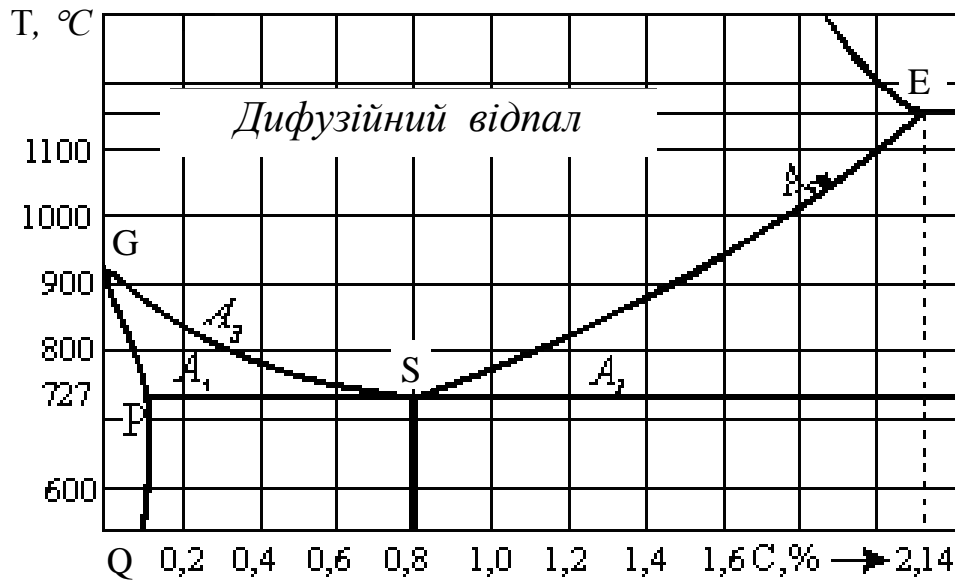


Рис. 2.1. Температури дифузійного відпалу

При високій температурі відбувається прискорення дифузійних процесів, які забезпечують вирівнювання хімічного складу в мікрооб'ємах сплаву, і сплав стає більш однорідним. Із підвищенням температури відпалу швидкість дифузії збільшується. Тому підвищення температури сталі дає більший ефект, ніж збільшення витримки. До того ж зростання тривалості нагрівання при відпалі сталі веде до зменшення продуктивності праці і підвищення собівартості продукції через перевитрати енергії. Проте при відпалі не можна допускати перепалу сталі — окиснення поверхні її зерен киснем повітря. Для попередження перепалу та знеуглецювання поверхні сталевих виробів іноді відпал їх здійснюють у захисних атмосферах.

### 2.2.3. Повний відпал

*Повний відпал* сталі призначають для утворення дрібнозернистої рівноважної структури в готових виробах, а також для зниження твердості і підвищення пластичності, ліквідації смугастої структури та зняття напружень перед наступною обробкою сталевих виробів різанням, штампуванням тощо. Його використовують в основному для обробки виробів з доевтектоїдних й евтектоїдної сталей (поковки, прокат, фасонні виливки та ін.).

Повний відпал виробів із заевтектоїдних сталей недоцільний, оскільки нагрівання їх вище лінії *SE* на діаграмі стану спричинює інтенсивний ріст аустенітного зерна (рис. 2.2).

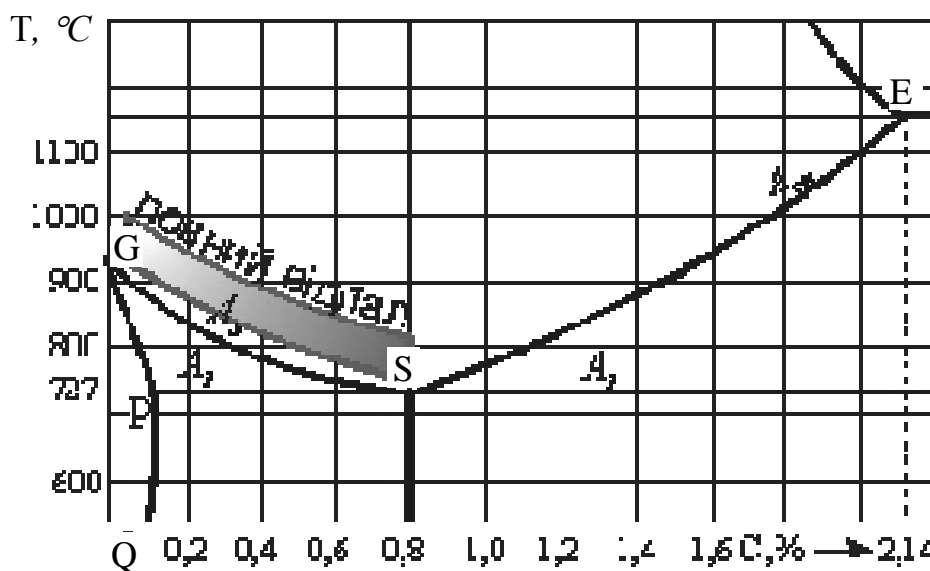


Рис. 2.2. Температури повного відпалу

Для *повного відпалу* сталеві вироби нагрівають до температури на 30...50 °C вище критичної точки  $A_{c3}$ , витримують при цій температурі для завершення перетворень і повільно охолоджують у печі або поступово зменшують її температуру.

Охолодження виробів у печі ведуть до температури приблизно 500 °C, забезпечуючи швидкість охолодження в межах

5...20 °С/год. Надалі вироби можна охолоджувати і швидше (на повітрі). Після нагрівання виробів вище критичної точки утворюється дрібнозернистий аустеніт, зерна якого при охолодженні розпадаються з утворенням феритно-перлітної суміші в доевтектоїдній і перлітної в евтектоїдній сталях. При цьому перліт має зернисту структуру. Повний відпал забезпечує отримання дрібнозернистої структури і зняття залишкових напружень у сталі.

### 2.2.4. Неповний відпал

*Неповний відпал* полягає в нагріванні сталі до температури на 20...50 °С вище критичної точки  $A_{c1}$  (рис. 2.3), витримці при цій температурі та повільному охолодженні в печі.

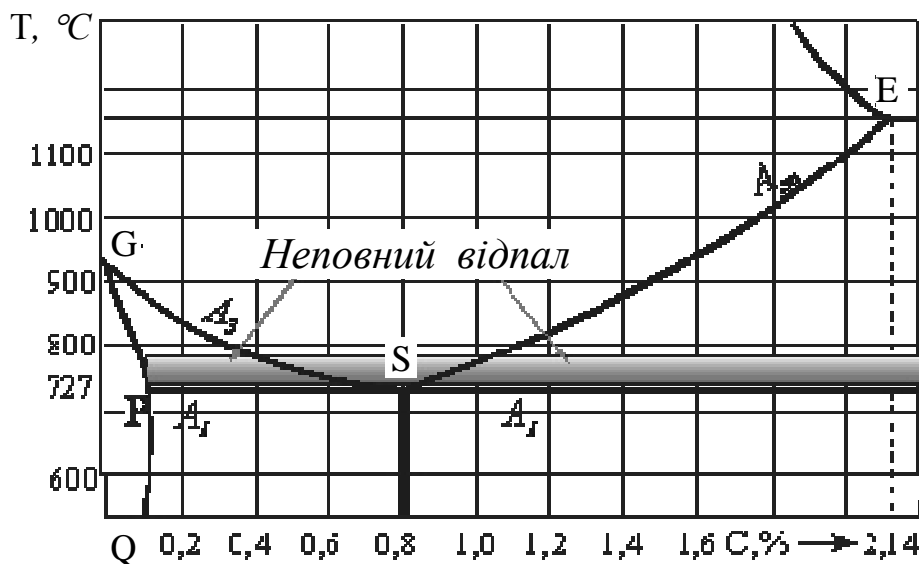


Рис. 2.3. Температури неповного відпалу

Внаслідок нагрівання до цієї температури в сталі відбувається перекристалізація тільки перліту, який перетворюється на аустеніт, а перетворення фериту в доевтектоїдній і цементиту в заевтектоїдній сталях відбувається лише частково. Після охоло-



дження аустеніт перетворюється на пластинчастий перліт, а ферит доевтектоїдної і цементит заевтектоїдної сталей залишаються незмінними.

Такий відпал не забезпечує повної перекристалізації та отримання однорідної структури сталі. Його проводять тільки тоді, коли потрібні зниження її твердості та зняття напружень. Тому такий відпал сталі називають *пом'якшувальним*. Застосування його скорочує витрати часу й енергії, завдяки чому вартість обробки сталевих виробів зменшується. Неповний відпал сталі за вказаним вище режимом можливий, якщо вторинний цементит не утворює сітки навколо зерен перліту. Для сталей, в яких присутня цементитна сітка, потрібна подвійна обробка: нагрівання вище точки  $A_{cm}$  й охолодження на повітрі (нормалізація) для того, щоб розчинити сітку цементиту і не дати йому виділитися в цій самій формі, а потім уже — проводиться неповний відпал сталі.

Внаслідок такої подвійної обробки сталі утворюються пластинчасті форми перліту (цементиту).

Сталі, у структурі яких цементит перліту і вторинний цементит мають круглу (глобулярну) форму мають значно меншу твердість, вищу в'язкість та кращу оброблюваність різанням. Для отримання такої структури застосовують сфероїдизуючий відпал, а відпал на зернистий цементит призначають для інструментальних та підшипникових сталей. Такий відпал полягає в нагріванні сталі до температури трохи вище точки  $A_1$  (рис. 2.3), витримці при цій температурі й повільному охолодженні до температури, що відповідає точці  $A_1$  чи трохи нижчій, після чого сталь нагрівають до температури вище точки  $A_{c1}$  і знову охолоджують, повторюючи цю операцію два-три рази. У зв'язку з таким характером виконання обробки такий відпал сталі називають *циклічним*, або *маятниковим відпалом*. Внаслідок невеликої температури нагрівання в сталі поряд з аустенітом зберігається велика кількість

центрів кристалізації, які сприяють утворенню зернистої форми перліту (цементиту). За наявності в сталі цементитної сітки сфероїдизуючому відпалу, як і при неповному відпалі, передує нормалізація. Слід зазначити, що утворенню зернистого цементиту сприяє попередня гаряча пластична деформація, під час якої цементитна сітка сталі подрібнюється. Такий вид відпалу іноді називається *відпалом сталі на зернистий перліт*.

Структурі зернистого перліту сталі надають перевагу як вихідній і перед її гартуванням. Тому металургійні заводи, як правило, поставляють інструментальну сталь машинобудуванню зі структурою зернистого перліту.

### 2.2.5. Рекристалізаційний відпал

*Рекристалізаційний відпал* (рис. 2.4) призначають для зменшення твердості, підвищення пластичності, усунення наклепу

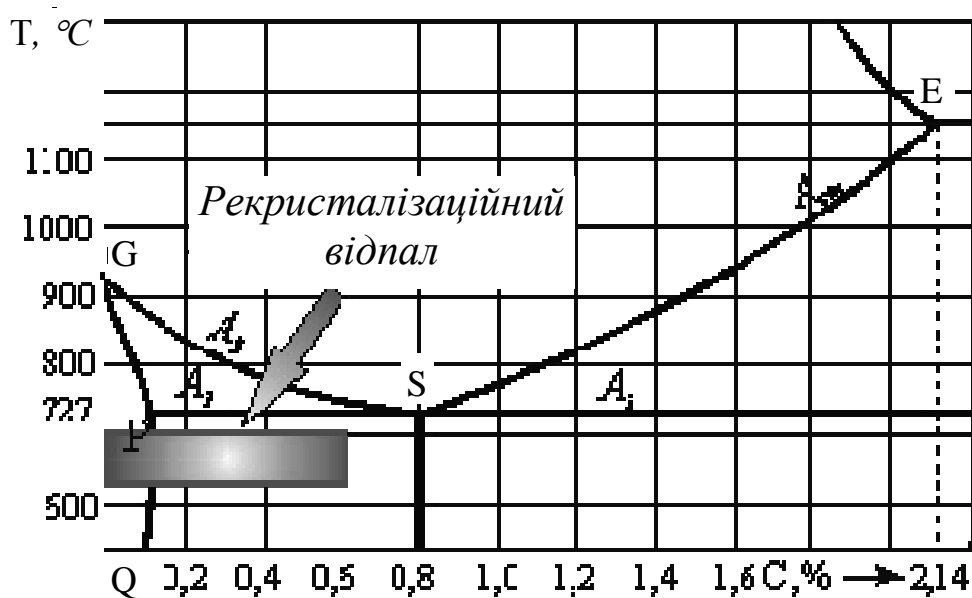


Рис. 2.4. Температури рекристалізаційного відпалу

після холодної обробки тиском холоднотягнутої, катаної або штампованої продукції у вигляді дроту, листів, прутків тощо з вуглецевої сталі, що містить 0,1...0,2 % С.

Таку обробку часто застосовують для відновлення пластичності при глибокій витяжці чи штампуванні виробів із сталі. Розподіливши їх на кілька проміжних стадій, після кожної знімають наклеп для створення можливості подальшого деформування виробів. Це дає змогу отримати велику ступінь деформації, яку не можна досягти при одноразовому деформуванні виробів.

Цей вид відпалу ґрунтується на явищі рекристалізації сталі. Доведено, що при нагріванні наклепаної сталі спочатку відбуваються зняття напружень й усунення спотворень кристалічних ґрат — процес повернення, який не супроводжується помітною зміною структури і властивостей сталі (ділянка 0-1 на рис. 2.5).

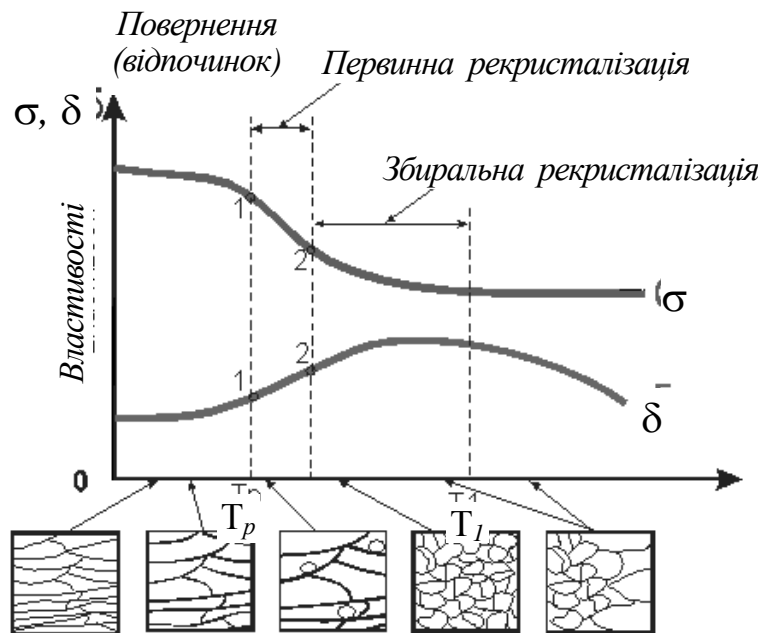


Рис. 2.5. Схема впливу відпалу на структуру деформованої сталі

Процес рекристалізації сталі — ріст нових зерен завдяки уламкам старих — починається при температурі  $T$  (точка 1 на рис. 2.5). При цьому розрізняють дві стадії рекристалізації сталі:

- *первинну* (рекристалізацію обробки), що полягає в утворенні й рості нових зерен завдяки старим тієї самої фази (ділянка 1-2 на рис. 2.5), причому структура сталі в кінці цієї стадії складається з нових, досить дрібних, рівновісних зерен;
- *збиральну* (ділянка після т. 2 на рис. 2.5), коли нові зерна, продовжуючи рости (завдяки сусіднім зернам, оскільки всі колишні вже вичерпано), утворюють все більші зерна.

На розміри зерна рекристалізованої сталі впливає також ступінь її деформації. Найбільші зерна утворюються після незначної попередньої деформації сталі порядку 3...15 %. Такий ступінь її деформації називається критичним. Наочне уявлення про залежність площі поверхні зерна від температури і ступеня пластичної деформації дає діаграма рекристалізації низьковуглецевої сталі (рис. 2.6).

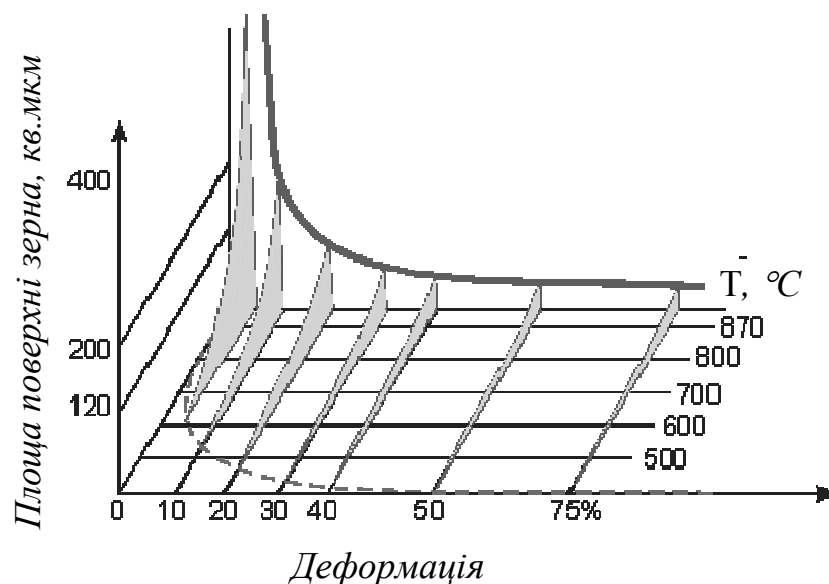


Рис. 2.6. Діаграма рекристалізації низьковуглецевої сталі

Як правило, рекристалізаційний відпал низьковуглецевих сталей ведуть при температурі 600...700 °C (рис. 2.4). Однак у деяких випадках застосовують також *неповний рекристалізаційний відпал*, який частково знімає наслідки наклепу і тому виконується

при нижчій температурі, та *текстуруючий відпал* при температурі нижче  $T$  для забезпечення певної анізотропії властивостей сталей. Тривалість витримки визначають практично залежно від температури відпалу сталі, перевіряючи завершення першої стадії рекристалізації. Швидкість охолодження сталевих виробів після відпалу не впливає на структуру і властивості сталі. Проте краще охолоджувати вироби повільно, щоб уникнути розвитку внутрішніх напружень при нерівномірному їх охолодженні, особливо якщо вони мають складну конфігурацію.

### 2.2.6. Ізотермічний відпал

З метою економії часу повний відпал сталі іноді замінюють *ізотермічним*. При такій обробці виріб нагрівають до тих самих температур, що й при повному відпалі сталі, швидко охолоджують до температури трохи нижче точки  $A_3$  і витримують при ній до повного завершення перетворення аустеніту на феритно-цементитну суміш. Тривалість витримки при температурі нижче точки  $A_3$  визначають за діаграмою ізотермічного розпаду аустеніту оброблюваної сталі (рис. 2.7).

Після такої витримки сталевий виріб охолоджують на відкритому повітрі. Під час витримки відбувається вирівнювання температури по всьому об'єму виробу, що сприяє отриманню однакових властивостей сталі. Такому відпалу піддають леговані сталі, при цьому витрати часу на процес скорочуються в 2...3 рази. Проте вигаш часу виходить тільки при обробці сталевих виробів невеликих розмірів, тому що для вирівнювання температури по об'єму великогабаритних виробів потрібен значний час. Після такого відпалу леговані сталі набувають однорідної структури. Вироби легко обробляються різанням, зменшується чутливість їх до утворення тріщин.

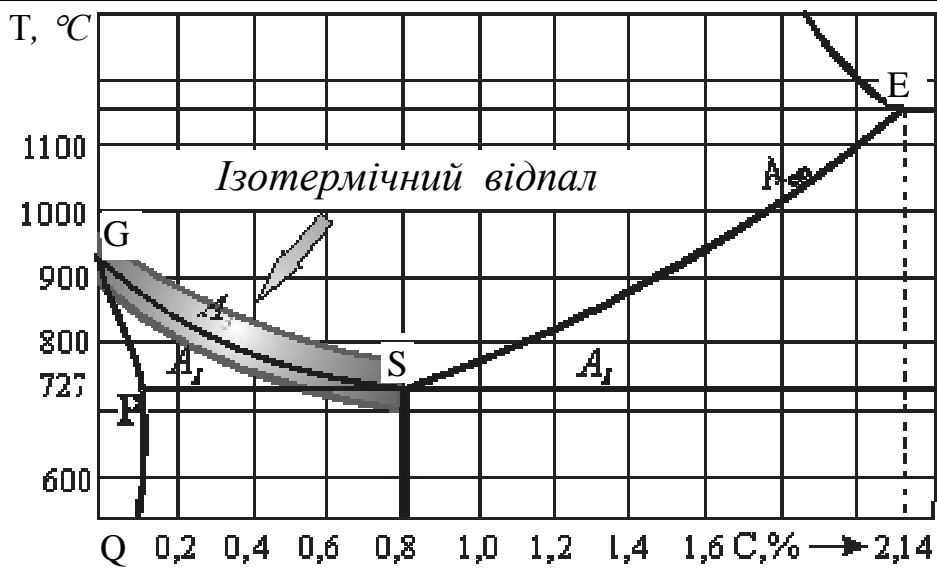


Рис. 2.7. Температури ізотермічного відпалу

### 2.2.7. Відпал для зняття внутрішніх напружень

Для зняття *внутрішніх напружень* призначають низькотемпературний відпал сталі при температурі нижче точки  $A_{c1}$  (рис. 2.8). Під час відпалу відбуваються переміщення атомів в

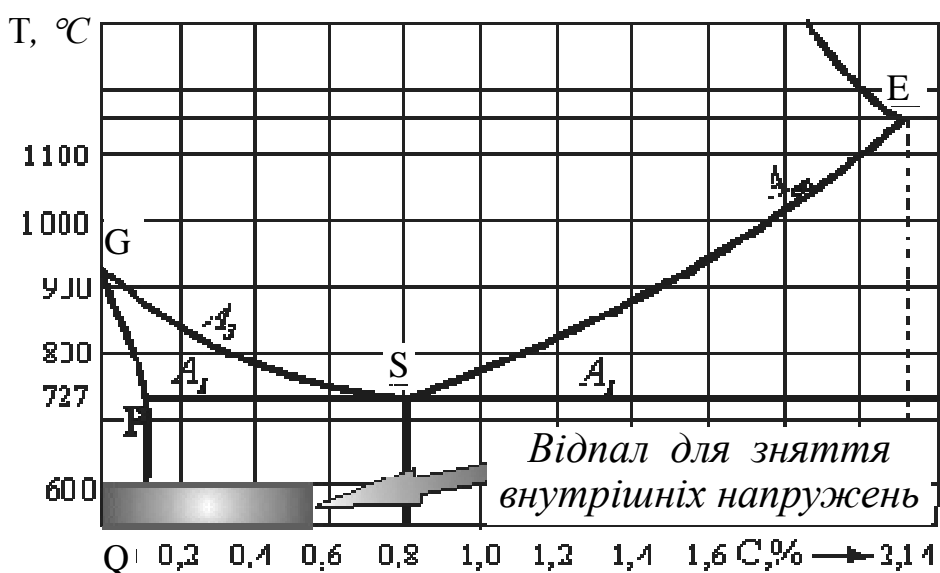


Рис. 2.8. Температури відпалу для зняття внутрішніх напружень

кристалічних ґратах у більш стійке положення, внаслідок чого діючі раніше в окремих зонах виробу пружні стиснення та напруження взаємно поглинаються, тобто залишкові напруження в сталі зникають.

Навіть невисокі температури нагрівання знімають частину внутрішніх напружень у виробі. Найповніше знімаються напруження, якщо температура відпалу співпадає з температурою рекристалізаційного відпалу, для сталі — це 600...680 °С. Такий відпал забезпечує одночасно зняття внутрішніх напружень у сталі та рекристалізацію її структури. Тривалість витримки при температурі відпалу сталі встановлюють з розрахунку 2,5 хв на 1 мм товщини перерізу виробу. Охолоджують сталеві вироби повільно (в печі). На виробництві цей відпал сталі іноді називають низьким. Його часто застосовують із метою підвищення опірності втомі, ударним навантаженням, корозійної стійкості, стабілізації розмірів, попередження короблення сталевих виробів та ін.

### 2.2.8. Нормалізація сталі

*Нормалізація* належить до досить поширених методів термообробки вуглецевих і низьколегованих сталей. Від повного відпалу вона відрізняється тим, що охолодження сталевих виробів після витримки в печі здійснюють прискорено — на відкритому повітрі або в його струмені (від вентилятора). Для *нормалізації* сталь нагрівають до повної перекристалізації, тобто на 30...50 °С вище критичної точки  $A_{c3}$  для доевтектоїдних сталей або  $A_{cm}$  для заевтектоїдних (рис. 2.9). Після охолодження на спокійному повітрі сталь набуває дрібнозернистої однорідної структури, зменшуються внутрішні напруження у виробах, усувається багато вад, що виникли при попередній обробці сталевих виробів.

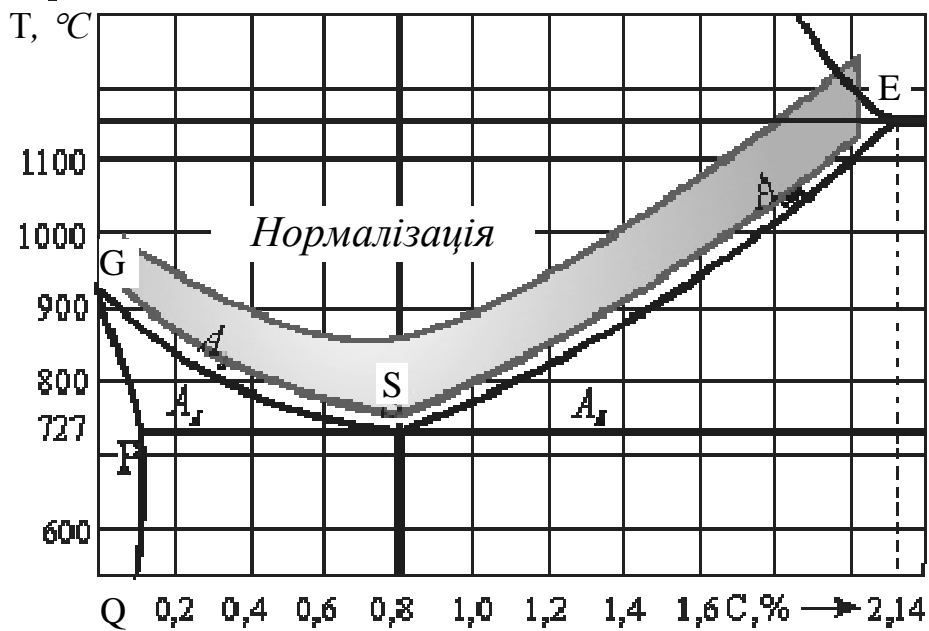


Рис. 2.9. Температури нормалізації сталі

Нормалізацію найчастіше застосовують як проміжну обробку для поліпшення структури сталі, наприклад перед її гартуванням. Однак іноді нормалізація може бути кінцевою, тому що надає можливість дістати сприятливе поєднання властивостей міцності та пластичності сталі, наприклад при виготовленні сортового прокату (рейки, швелери тощо). В економічному відношенні нормалізація сталі значно дешевша за відпал сталі. Оскільки печі використовують лише для нагрівання та витримки сталевих виробів при температурі нормалізації, скорочується цикл їх обробки і зменшуються витрати енергії.



## 2.3. Гартування сталі. Основні види гартування та їх призначення

### 2.3.1. Режим нагрівання сталі

*Гартування* — зміцнювальний вид термообробки для підвищення міцності, твердості та стійкості до спрацювання деталей. Зміна властивості сталі після гартування пов'язана з утворенням метастабільної (нерівноважної) її структури.

Для отримання метастабільних структур деталі нагрівають і витримують при температурі існування аустеніту, а потім охолоджують зі швидкістю, яка дає змогу зафіксувати мартенсит. Результати гартування залежать від температури нагрівання, тривалості витримки, швидкості охолодження деталей тощо.

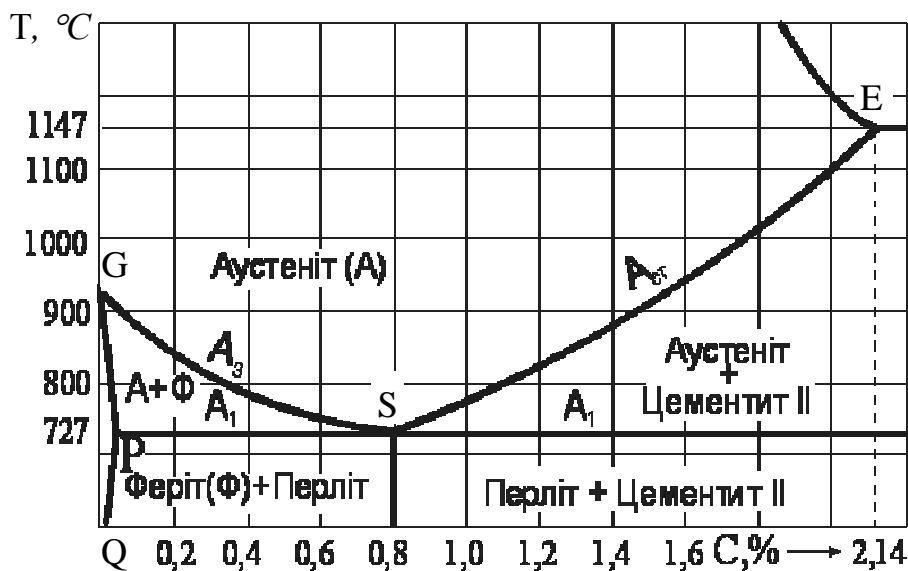


Рис. 2.10. Частина діаграми стану залізо — цементит

Практично з метою перетворення перліту на аустеніт сталь потрібно нагріти вище лінії евтектоїдного перетворення (рис. 2.10), витримати до утворення однорідного за складом аус-

теніту (твердого розчину вуглецю в залізі Fe<sub>3</sub>C) й охолодити з критичною швидкістю гартування, що не допускає утворення рівновісної структури.

Для гартування доєвтектоїдної сталі її нагрівають до температури вище критичної точки  $A_{c3}$ , а евтектоїдну і заєвтектоїдну сталі — вище точки  $A_{c1}$  на 30...50 °С, витримують при цій температурі й охолоджують зі швидкістю, не меншою за критичну (рис. 2.11).

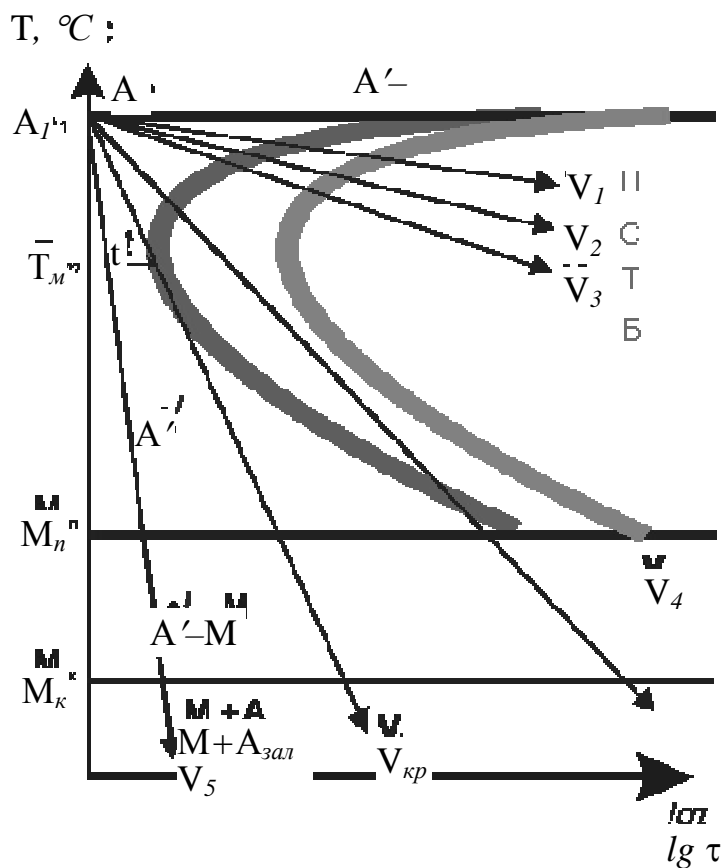


Рис. 2.11. Залежність структури евтектоїдної сталі від швидкості охолодження

Підвищення твердості загартованої евтектоїдної сталі порівняно з відпаленою значне, приблизно в 3,5 рази. Якщо до гартування відпалена сталь мала твердість 180 НВ, то після гартування її твердість зростає до 670 НВ.

Гартують, як правило, сталі з підвищеним вмістом вуглецю. Сталі, в яких вміст вуглецю менший за 0,3 %, не гартують, оскільки в них не відбувається суттєвого підвищення твердості та міцності. Міцність сталі після гартування підвищується в міру збільшення вмісту вуглецю до 0,7 %, а потім вона залишається практично сталою на рівні приблизно 670 НВ. Загартована доевтектоїдна сталь, як правило, має структуру дрібногочкового мартенситу з незначною кількістю залишкового аустеніту, евтектоїдна сталь — структуру мартенситу з залишковим аустенітом, а заевтектоїдна — структуру мартенситу із вторинним цементитом і залишковим аустенітом.

### 2.3.2. Види гартування та їх призначення

Розрізняють *повне* та *неповне* гартування сталі.

Для *повного гартування* сталь нагрівають до температури на 30...50 °С вище критичної точки  $A_3$  ( $A_{cm}$ ), а для *неповного* — вище точки  $A_{c1}$  але нижче точки  $A_3$  ( $A_{cm}$ ). Температура гартування визначається залежно від вмісту вуглецю по лініях діаграми стану сплавів залізо — цементит (рис. 2.10).

Для доевтектоїдної сталі застосовують тільки повне гартування, а для заевтектоїдної — неповне, коли в її структурі залишається надмірний цементит, який не розчинився. Цементит — складова міцна, тому наявність його в загартованій сталі підвищує міцність, але і крихкість деталі. З метою зменшення крихкості загартованої сталі перед гартуванням слід виконати нормалізацію або сфероїдизацію сталі, щоб подробити цементитну сітку. Нагрівати заевтектоїдну сталь вище критичної точки  $A_{cm}$  (повне гартування) недоцільно, оскільки при охолодженні в сталі утвориться великогоччатий мартенсит. Крім того, збільшується аус-

тенітне зерно, з поверхні виробів випаюється вуглець і збільшуються гартівні напруження.

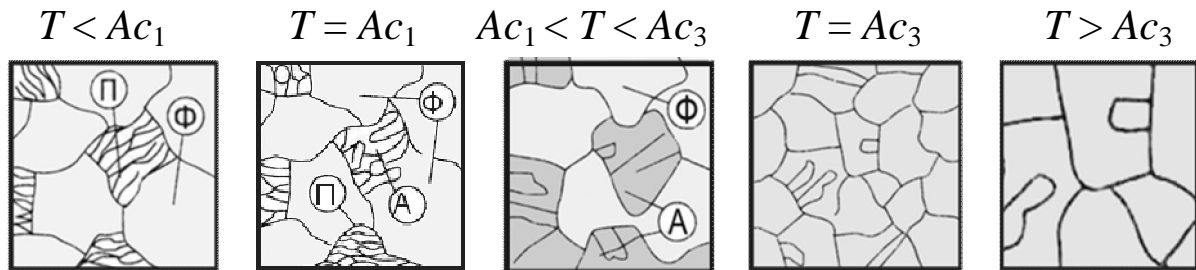


Рис. 2.12. Схема процесу аустенізації в сталі (C = 0,3 %) при її нагріванні

При нагріванні доєвтектоїдної сталі (рис. 2.12) в інтервалі температур  $T < A_{c1}$  структура складається з зерен перліту (П) і фериту (Ф). Наступне підвищення температури до  $T = A_{c1}$  зумовлює утворення зародків аустеніту в перліті та фериті. Воно відбувається на міжфазних межах ферит — цементит. Перекристалізація супроводжується двома паралельними процесами: це поліморфне перетворення та розчинення цементиту. Процес перетворення при температурі  $A_{c1}$  веде до подрібнення зерна сталі внаслідок одночасного зародження в перлітній колонії кількох центрів кристалізації аустеніту. Дисперсність вихідної структури перліту та швидкість нагрівання взаємно пов'язані з утворенням центрів кристалізації аустеніту. При температурі  $A_{c1}$  швидкість утворення аустеніту прискорюється з підвищенням швидкості нагрівання та дисперсності вихідної структури. Застосовуючи високошвидкісні способи нагрівання сталі, наприклад струмами високої частоти (СВЧ), отримують дуже дрібнозернисті структури.

Розглянемо процес аустенізації при підготовці для гартування евтектоїдної сталі, що містить 0,8 % С (рис. 2.13).

При нагріванні до температури  $T < A_{c1}$  сталь зберігатиме перлітну структуру (П). При подальшому нагріванні, коли температура сталі досягне значення  $T = A_{c1}$ , у перліті на міжфазних

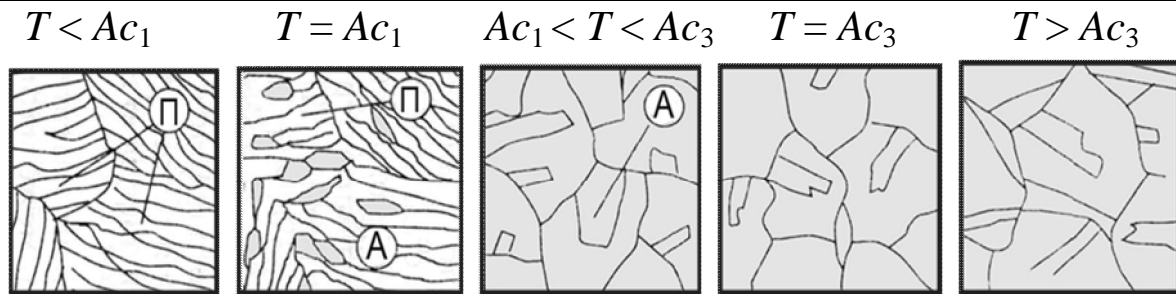


Рис. 2.13. Схема процесу аустенізації в сталі ( $C = 0,8\%$ ) при її нагріванні

межах ферит — цементит почнуть з'являтися зародки аустеніту (А). Наступне підвищення температури сприяє перекристалізації з утворенням нових центрів кристалізації аустеніту. Теоретично процес перетворення перліту на аустеніт відбувається при температурі  $Ac_1 < T < Ac_3$ . Подальше підвищення температури зумовлює тільки ріст аустенітного зерна. При температурі  $T = Ac_3$  та наявності великого зерна можливим є перегрівання сталі, а при температурі  $T > Ac_3$ , що за значенням наближається до лінії солідуса, — перепал і навіть оплавлення сталі.

У заевтектоїдній сталі (рис. 2.14) процес утворення аустеніту відбувається майже так само, як і в доевтектоїдній.

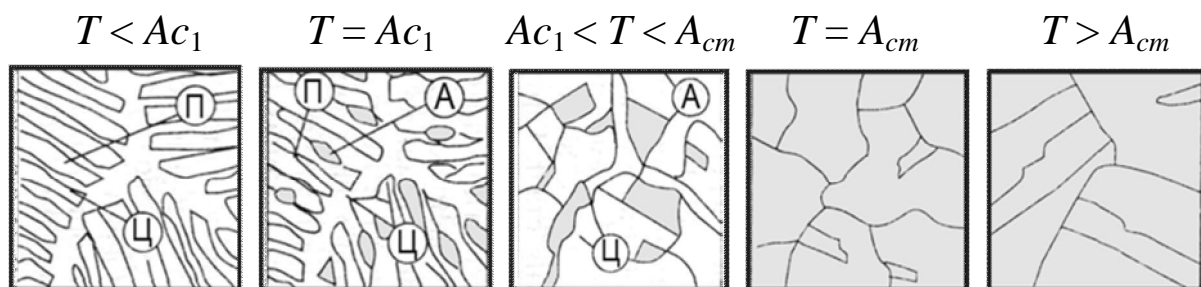


Рис. 2.14. Схема процесу аустенізації в сталі ( $C = 1,2\%$ ) при її нагріванні

При нагріванні в інтервалі температур  $T < Ac_1$  структура сталі складається з зерен перліту (П) і цементиту (Ц). Підвищення температури до  $T = Ac_1$  спричинює утворення аустеніту в зернах перліту зі збереженням у структурі сталі надмірного вторин-

ного цементиту. Розчинення його в аустеніті відбувається при температурі  $A_{c1} < T < A_{cm}$ . Цей процес супроводжується дифузією вуглецю і ростом аустенітних зерен.

При виборі швидкості нагрівання та тривалості витримки виробів у печі використовують ті закономірності, що й для їх відпалу. При цьому слід зазначити, що для процесу гартування тривалість витримки частіше визначають за таблицями, складеними на підставі узагальнення накопиченого досвіду й експериментальних даних. Це пов'язано з надзвичайно великою номенклатурою виробів за формою, розмірами та матеріалами, які піддаються цьому виду термообробки.

### 2.3.3. Вибір технологічних параметрів при охолодженні

Вирішальну роль в утворенні мартенситу при гартуванні сталі відіграє швидкість охолодження аустеніту. Як впливає з діаграми ізотермічного розпаду аустеніту (рис. 2.15), вона має бути більшою за  $V_{кр}$  (наприклад,  $V_5$ ), але не повинна виходити за межі інтервалу температур мінімальної стійкості аустеніту (поблизу точки  $T_m$ ).

В області температур, розташованих вище точки  $T_m$ , вигідним є охолодження сталі з помірною швидкістю. Для середньовуглецевих сталей область мінімальної стійкості аустеніту лежить між 650 і 500 °С. При вищих температурах аустеніт відносно стійкий, і передчасне перетворення його на феритно-перлітну суміш не відбувається. В той же час при плавному охолодженні сталі в області високих температур вирівнюється температура по перерізу і зменшуються температурні напруження. Сталь ще досить пластична, тому ймовірність короблення сталевих виробів та утворення тріщин — мінімальна.

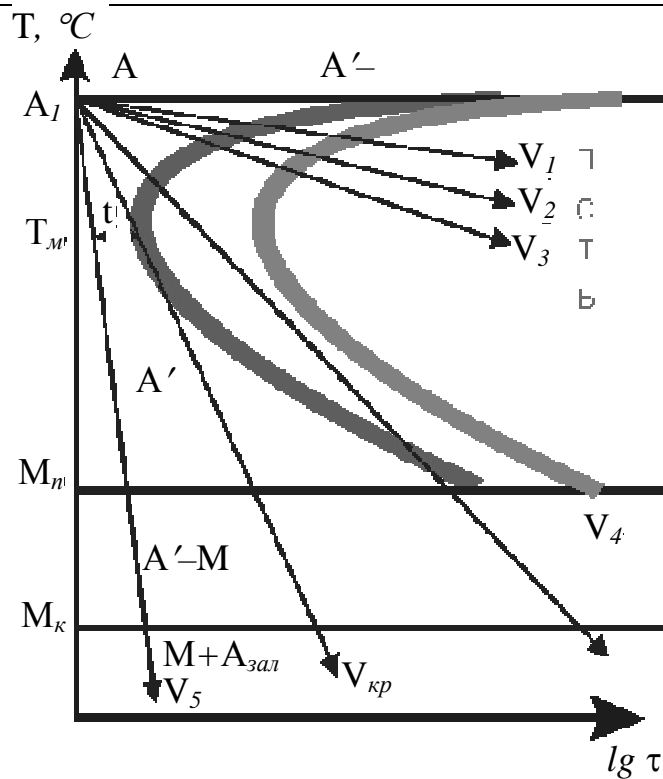


Рис. 2.15. Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту

Повільне охолодження сталі бажане також в області, розташованій нижче інтервалу температур мінімальної стійкості аустеніту, тому що там його стійкість знову підвищується. При  $300^{\circ}\text{C}$  і нижче швидке охолодження сталі особливо небезпечно внаслідок того, що вона стає не такою пластичною, ніж при високих температурах. Термічні напруження в сталі додаються до напружень, які виникають при перетворенні аустеніту на мартенсит. Тому при швидкому охолодженні підвищується небезпека утворення тріщин і короблення сталі.

Швидкість охолодження сталевих деталей можна регулювати, застосовуючи різноманітні гартівні середовища: воду, водні розчини кислот, водні розчини солей, різні мастила, емульсії, луги та полімери, розплавлені солі та метали, повітря, гази тощо.

Головною вимогою до гартівних середовищ є велика охолодна здатність в інтервалі температур  $650\dots 550^{\circ}\text{C}$  (температурний

інтервал мінімальної стійкості аустеніту рис. 2.15) і зменшена охолодна здатність при 300 °С і нижче (в інтервалі температур мартенситного перетворення).

Гартування найчастіше здійснюють занурюванням нагрітого виробу в охолодне середовище.

Охолодження відбувається в три стадії:

- I стадія — плівкове кипіння, бульбашкове кипіння, контактний теплообмін;
- II стадія — руйнування парової плівки, зіткнення всієї поверхні виробу з рідиною;
- III стадія — кипіння рідини та пароутворення відсутнє, конвективний теплообмін

На швидкість гартування сталі впливають природа охолодної рідини та її температура. Гартівне середовище вибирають, виходячи з критичної швидкості гартування сталі. Залежно від інтенсивності її охолодження внаслідок гартування можна отримати структуру мартенситу, трооститу чи сорбіту. Орієнтуючись на кінцеву структуру, для охолодження сталі вибирають відповідне охолодне середовище. Воно повинно бути нетоксичним, дешевим, вибухово- і пожежобезпечним та мати інші властивості, які забезпечують нормальну роботу дільниці.

Порівняльну характеристику охолодної здатності різних середовищ наведено в таблиці 2.1. Висока охолодна здатність води та деяких водних розчинів пов'язана з великою теплоємністю й, особливо, з високим значенням теплоти пароутворення води. З підвищенням температури її охолодна здатність різко спадає і при 50 °С стає меншою від охолодної здатності мастил. Кипляча вода взагалі не забезпечує гартування, оскільки виріб, занурений в таку воду, покривається шаром малотеплопровідної пари, який ускладнює охолодження сталі. Поява парової оболонки або прилипання бульбашок пари до поверхні охолоджуваного виробу



може відбутись також при його охолодженні в холодній воді, що може призвести до «плямистого» гартування. Тому виріб у гартівній ванні потрібно енергійно переміщати, а вода в ній має бути проточною. Різко підвищують охолодну здатність води розчинені в ній солі, луги тощо (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1. Швидкість охолодження сталі в гартівних середовищах

Гартівне середовище	Швидкість охолодження (°C/с), в інтервалі температур °C	
	650-550	300-200
Дистильована вода	250	200
Вода при температурі:		
18	600	270
28	500	270
45	100	270
74	30	200
10% водний розчин при 18 °C:		
NaOH	1200	300
NaCl	110	300
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	800	270
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	750	300
5% водний розчин KMnO <sub>4</sub>	450	100
Гліцерин	135	175
Емульсія мастила у воді	70	200
Мильна вода	30	200
Повітря: спокійне	3	1
під тиском	30	10

Помірними охолодниками є мінеральні чи рослинні мастила (таблиця 2.2) і вода, підігріта до температури вище 50 °C.

Охолодні дії мастила та підігрітої води неоднакові. Мастило, наприклад, охолоджує деталі з відносно малими швидкостями

в інтервалі високих і низьких температур, а підігріта вода створює сповільнене охолодження лише при температурі 550...650 °С. Швидкість охолодження деталей в мастилі при температурі 300 °С мало не рівнозначна дії холодної води. Крім того, мастило, нагріваючись під час гартування сталі, майже не змінює своїх охолодних властивостей, а нагріта вода змінює.

Таблиця 2.2. Характеристика мастильних охолодників

Мастило	Температура, °С			Відносна в'язкість
	спалаху	застигання	застосування	
Індустріальне 12 (веретенне 2)	165	-30	120-150	2
Індустріальне 20 (веретенне 3)	170	-20	120-150	3
Індустріальне 30 (машинне Л)	180	-15	120-160	4
Індустріальне 45 (машинне С)	190	-10	120-170	6
Індустріальне 50 (машинне СУ)	200	-20	120-180	7
Циліндрове важке 52	310	-5	200-280	8
Авіаційне МС20 (світлогартоване)	225	-18	130-200	-
МЗМ-16	150	-	30-50	18
МЗМ-26	190	-	70-120	27
МЗМ-120	250	-	160-190	118

Найкращі охолодні властивості має підігріте мастило. Тому, як правило, гартування сталі ведуть у нагрітому мастилі (до 70...80 °С), а щоб уникнути «пістрявості» гартування, здійснюють циркуляцію мастила і жорсткий контроль його температури. Охо-

лодне середовище із мастила створює рівномірні умови охолодження сталі в усьому інтервалі температур охолодження. Застосування циркуляції охолодного середовища із мастила, як і водного, підвищує швидкість охолодження сталі, причому охолодження її в мастилi сприяє утворенню однорідної структури в загартованих сталях. Тому мастило як охолодник не можна замінити ні нагрітою водою, ні водяними емульсіями.

До недоліків, які має мінеральне мастило, можна віднести повільне охолодження сталі у перлітному інтервалі температур та зниження гартівної здатності внаслідок його згущення у процесі нагрівання, спалахування і пригоряння до поверхні виробів. До того ж мастило — вартісний охолодник. Через це ведуться пошуки дешевших та придатних за швидкістю охолодження синтетичних охолодних середовищ.

Слід зазначити, що ультразвукові коливання в охолодному середовищі сприятливо діють на процес гартування сталі. Відносно структур, які утворюються під час її гартування, то на формування їх впливають матеріал виробу, маса і його форма.

Залежно від виду виробів та охолодного обладнання необхідно застосовувати відповідні способи занурення їх в охолодник. Неприпустимо, наприклад, класти виріб, що охолоджується, на дно ванни. Під час занурювання виробів можна керуватися такими положеннями: довгі та тонкі вироби (свердла, розвертки, протяжки, напилки) слід занурювати вертикально, тонкі й плоскі (дискові фрези, пилки, пластини тощо) — вузьким боком, порожнисті (циліндричні фрези, штампи тощо) — порожниною доверху. Громіздкі вироби треба охолоджувати проточною рідиною. Для місцевого гартування нагрівають відповідне місце виробу й охолоджують його струминою рідини або ж виріб розміщують у ванні нагрітою частиною, що гартується.

### 2.3.4. Способи гартування сталі

Для гартування сталі застосовують різні способи. Їх вибирають залежно від її хімічного складу, форми та розмірів деталей і технічних вимог до них. При цьому для охолодження деталей використовують такі способи:

- *звичайний* — зануренням деталі в рідину з енергійним переміщенням її у ванні;
- *душовий* (розбризуванням) — подачею струмینی суміші рідини та повітря на поверхню деталі;
- *ступінчастий* — спочатку деталь охолоджують у воді, а потім у мастилі;
- *переривчастий* — спочатку деталь охолоджують у воді, а потім на повітрі;
- *місцевий* — зануренням частини деталі в охолодне середовище.

Для зміцнення простих за формою деталей з вуглецевих і спеціальних сталей найчастіше застосовують *безперервне гартування* (в одному охолодному середовищі). Його здійснюють зануренням нагрітої деталі в охолодник (воду, водянні розчини чи мастила), в якому вона втримується до повного охолодження.

Для отримання високої твердості та найбільшої глибини гартування вуглецевої сталі використовують *душове охолодження*. Зміну температури деталі під час її охолодження відображує крива 1 (рис. 2.16).

Кінцевою структурою сталі є мартенсит і залишковий аустеніт або мартенсит, карбіди та залишковий аустеніт залежно від вмісту вуглецю в сталі. Якщо в структурі загартованих високовуглецевих і легованих сталей утворюється велика кількість залишкового аустеніту, то після гартування деталі її піддають обробці холодом, витримуючи в термостаті, температура якого нижча за точку *M*.

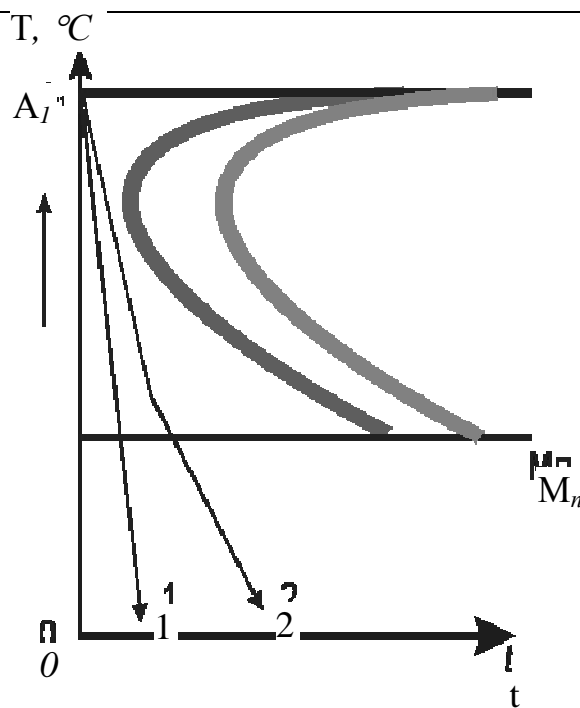


Рис. 2.16. Криві охолодження сталі на діаграмі ізотермічного розпаду аустеніту, при безперервному (1) та переривчастому гартуванні (2)

Цей спосіб гартування сталі досить простий і легко піддається механізації та автоматизації, що спрощує розташування термічних агрегатів у технологічній лінії. Проте його суттєвим недоліком є велика ймовірність появи короблення і гартівних тріщин, тому що в момент утворення мартенситу максимуми температурних та структурних напружень співпадають. Для запобігання такого виду браку гартування сталі здійснюють з остуджуванням або застосовують спеціальні гартівні машини і преси, що дає змогу зменшити різницю температур виробів й охолодного середовища.

Зменшення напружень у мартенситному інтервалі температур можна досягти *переривчастим охолодженням* сталі (попередньо у двох середовищах). Перший охолодник має забезпечувати різке переохолодження аустеніту в інтервалі температур його мінімальної стійкості до температури вище точки  $M_{\text{п}}$  (рис. 2.16, крива 2), а закінчувати охолодження для утворення мартенситної

структури слід у менш інтенсивному охолоднику (цим охолодником може бути повітря).

Найчастіше застосовують *переривчасте гартування «через воду в мастила»* (після занурення деталі на кілька секунд у воду її переносять у мастильну ванну до повного охолодження).

Гартування цим способом використовують при виготовленні інструментів з високовуглецевих та спеціальних сталей. Єдина незручність його полягає у складності визначення тривалості витримки деталей в першому охолоднику.

Різновидами переривчастого гартування сталі є *ступінчасте й ізотермічне*. Для зміцнення тонких деталей з вуглецевих сталей застосовують *ступінчасте гартування*, оскільки при цьому створюються найменші внутрішні напруження.

Таке гартування здійснюють у двох охолодниках: спочатку деталь швидко охолоджують у розплаві солі чи лугу з температурою трохи вищою від точки мартенситного перетворення  $M_{\text{п}}$  (рис. 2.17), потім її витримують до вирівнювання температури по

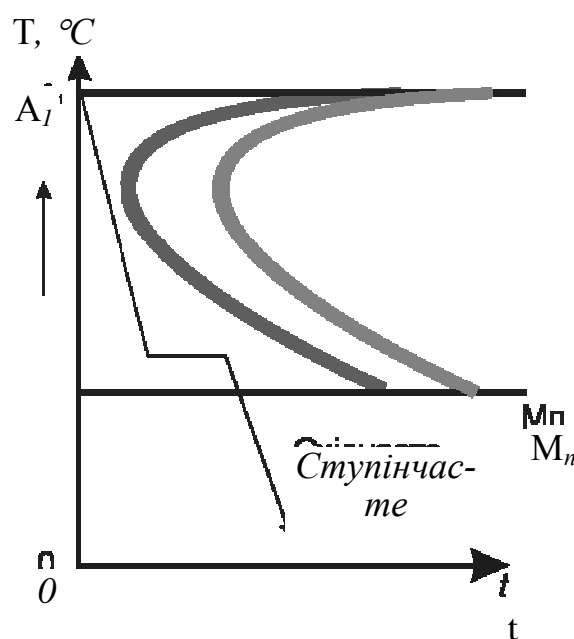


Рис. 2.17. Крива охолодження сталі на діаграмі ізотермічного розпаду аустеніту, при ступінчастому гартуванні

всьому перерізу, а далі охолоджують до зовнішньої температури в мастилі або на повітрі в закритому приміщенні.

Виконання ступінчастого гартування простіше, ніж переривчастого («через воду в мастило»), а результати його більш стабільні. До переваг ступінчастого гартування сталі належать також зменшення гартівних напружень, тобто запобігається утворення короблення і тріщин, з'являється можливість виправляти деталі після виймання їх з охолодника, коли вони ще перебувають в аустенітному стані та мають високу пластичність. Правку виконують вручну або на пресах. Крім правки та рихтування, метал можна гнути й виконувати інші деформуючі операції.

Суттєвий недолік способу — неможливість застосування його для гартування великих деталей, тому що швидкість охолодження в розплавах солей чи лугів виявляється для них недостатньою, щоб попередити утворення трооститу. Крім того, спосіб досить складний для автоматизації термічних процесів.

Ступінчасте гартування доцільне для деталей діаметром до 10...12 мм з вуглецевих сталей і деталей діаметром до 20...30 мм з легованих сталей (хромистих ШХ15, ХВГ, 9ХС тощо). Як правило, деталі після ступінчастого гартування в розплавлених лугах не окиснюються та не зневуглецьовуються і зберігають чисту поверхню. Тому таке гартування називають *світлим*.

*Ізотермічне гартування* (або гартування в гарячих середовищах) у загальних рисах схоже на ступінчасте і має подібні переваги та недоліки. Для гартування нагріту деталь поміщають у гаряче мастило чи розплав солі або лугу, температура яких трохи вища за точку  $M_n$  (рис. 2.18), але витримують у них досить довго — до повного чи неповного перетворення аустеніту. Подальше охолодження деталі відбувається на повітрі. Кінцева структура — бейніт або бейніт та карбіди, іноді також мартенсит і залишковий аустеніт. Після гартування нема потреби виконувати відпуск сталі.

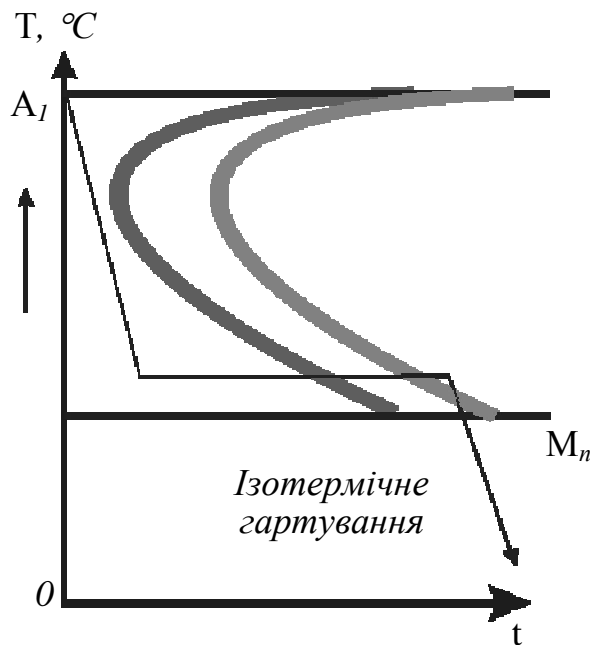


Рис. 2.18. Крива охолодження сталі на діаграмі ізотермічного розпаду аустеніту, при ізотермічному гартуванні

Для здійснення ступінчастого й ізотермічного способів гартування сталі ефективними охолодними середовищами є розплавлені солі складу 55 %  $KNO_3$  та 45 %  $NaNO_3$  або лужний розплав складу 20 %  $NaOH$  і 80 %  $KOH$ .

Щоб прискорити швидкість охолодження виробу при гартуванні, рекомендується до розплаву солі та лугу додати 5...10 % води. Тривалість процесу гартування визначається за допомогою діаграми ізотермічного розпаду аустеніту (рис. 1.7).

Основна перевага способу ізотермічного гартування сталі — різке зменшення гартівних напружень, деформації деталі та кількості тріщин, а також властивість деяких легованих сталей при бейнітному перетворенні зберігати залишковий аустеніт, який не переходить у мартенсит при ізотермічній витримці, що забезпечує високу ударну в'язкість сталі. Крім того, ізотермічне гартування, як і ступінчасте, дає змогу виконувати правку деталей, які перебувають в аустенітному стані й мають високу пластичність.



Ізотермічне гартування сталі широко застосовується в виробництві, оскільки в сталевих деталях після термообробки найбільш вдало поєднуються міцність, пластичність, в'язкість і опір ударним навантаженням. Ізотермічне гартування підвищує конструктивну міцність сталі і використовується для зміцнення пружин, ресор тощо. Значне підвищення властивостей легованої сталі після ізотермічного гартування порівняно зі звичайним робить його вигідним для виготовлення деталей, інструментів із сталей марок 6ХС, 9ХС, ХВГ тощо.

*Гартування з самовідпуском* застосовується при виготовленні слюсарного інструмента, який сприймає удари в процесі обробки металу. Це гартування виконують при виготовленні зубил, молотків, різного ковальського й ударного інструмента, коли за технічними умовами роботи вимагається, щоб серцевина була м'якшою, ніж зовнішні шари, а твердість поступово зменшувалась від поверхні до серцевини.

Гартування з самовідпуском передбачає часткове охолодження лише поверхні або частини виробу та відпуск завдяки залишковій внутрішній теплоті з метою отримання мартенситу відпуску або структури продуктів його розпаду. Технологія гартування зводиться до наступного:

- зачищення поверхні нагрітого виробу;
- витримка на повітрі до появи на зачищеній поверхні потрібного кольору мінливості;
- занурення інструмента у воду або повне його охолодження.

Кольори мінливості з'являються внаслідок окиснення металу під час нагрівання виробу з утворенням тонкої прозорої плівки оксидів з різноманітним відтінком залежно від її товщини. Температура нагрівання виробу завдяки внутрішнім шарам металу під час гартування з самовідпуском визначається за кольорами мінливості або за допомогою термофарб чи термоолівців. Колір

мінливості залежить від товщини плівки, а також від температури нагрівання та часу витримки. Температуру нагрівання сталі для самовідпуску залежно від кольорів її мінливості наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Характеристика кольорів мінливості сталі

Колір мінливості	Температура нагрівання сталі, °С	Товщина шару оксиду, мм
Світло-жовтий	200...240	0,045
Темно-жовтий	240...260	0,050
Коричневий	260...280	0,055
Фіолетовий	280...290	0,065
Синій	290...325	0,070
Сірий	>330	---

Для перетворення залишкового аустеніту та стабілізації розмірів, підвищення твердості, а також зносостійкості, загартовані приведеніми способами виробу гартують з обробкою холодом (глава 1.3). Їх охолоджують до температури нижче 0 °С, але тільки в інтервалі температур  $M_{\text{п}} \sim M_{\text{к}}$  з метою додаткового перетворення аустеніту на мартенсит. Як правило, використовують охолодження до температури близько -80 °С. Щоб уникнути стабілізації аустеніту, обробку виробів холодом бажано здійснювати відразу після їх гартування. Обробка холодом не зменшує внутрішні напруження в сталі і потребує подальшого відпуску.

## 2.4. Відпуск сталі.

### Види відпуску, структура, властивості та їх призначення

Відпуск сталі належить до завершальних операцій її термообробки і здійснюється після гартування сталі. Відпуском усува-

ють надмірну крихкість загартованої сталі та отримують структуру, стійкішу при звичайній температурі, з кращими механічними властивостями. Відпуск сталі полягає в тому, що загартовані деталі нагрівають до температури, нижчої за межу структурних перетворень ( $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), витримують і потім охолоджують з помірною швидкістю. Деякі сталі слід охолоджувати швидко у воді або в мастилі.

Залежно від температури та структури металу, що утворилася, розрізняють:

- *Низький відпуск* — здійснюється нагріванням сталі до  $150\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$  й охолодженням її з будь-якою швидкістю. Цей вид відпуску сталі застосовують для виготовлення різноманітних різальних та вимірювальних інструментів із вуглецевих і низьколегованих сталей, а також деталей після обробки їхніх поверхонь гартуванням, цементацією тощо.
- *Середній відпуск* — здійснюється нагріванням сталі до  $300\text{...}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коли мартенсит перетворюється на троостит відпуску. Середній відпуск використовується при виготовленні різноманітних деталей, що працюють в умовах тертя (пружин, ресор, штампів тощо).
- *Високий відпуск* — здійснюється нагріванням сталі до  $500\text{...}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коли мартенсит перетворюється на сорбіт відпуску. Деякі сталі після цього відпуску охолоджують у воді або в мастилі. Високий відпуск застосовують для деталей з конструкційних сталей, що працюють при підвищених і динамічних навантаженнях (вали, осі, елементи кріплення).

Іноді процес гартування з високим відпуском називають *поліпшенням сталі*. Після такої обробки сталь набуває кращого поєднання міцності та в'язкості порівняно з відпалюванням і нормалізацією. Таку обробку призначають для відповідальних деталей у машинах, що працюють при високих навантаженнях.

У сталі, обробленій на сорбіт відпуску, зменшується твердість до 250...350 НВ, знижується міцність у 1,5...2 рази, а пластичність і в'язкість збільшуються в кілька разів. Відпуск, виконаний при температурі 600...650 °С, повністю усуває внутрішні напруження в сталі.

Швидкість охолодження сталі при всіх видах її відпуску впливає на значення внутрішніх напружень. Зменшення швидкості охолодження сприяє зниженню внутрішніх напружень у загартованих деталях при всіх видах відпуску сталі. Тому деталі складної форми рекомендується охолоджувати повільно. Це усуває їх короблення.

Деталі після гартування мають метастабільну структуру. Нагрівання їх збільшує рухливість атомів, що сприяє процесу утворення більш рівноважної структури. Найважливішою особливістю процесу відпуску сталі є розпад мартенситу.

Зміна структур, яка відбувається при відпуску деталей з вуглецевих сталей, визначається температурою та тривалістю відпуску, а також концентрацією вуглецю в сталі. Чим більший вміст вуглецю в аустеніті, тим вища перенасиченість  $\alpha$ -розчину та нижча температура мартенситного перетворення при гартуванні сталі, тим більша кількість залишкового аустеніту в ній.

Відпуск вуглецевих сталей супроводжується структурними змінами передусім у кристалах мартенситу. Першою причиною таких змін є утворення в мартенситі ділянок із неоднорідною концентрацією (сегрегації) вуглецю.

При відпуску сталі прийнято виділяти чотири інтервали температур, при яких спостерігаються основні перетворення в структурі сталі.

*Перше перетворення при відпуску* протікає в інтервалі температур 80—200 °С і полягає у виділенні частини вуглецю у вигляді метастабільного  $\epsilon$ -карбіду. Дуже дисперсні його кристали

когерентно зв'язані з ґратами мартенситу. Збіднення мартенситу вуглецем відбувається нерівномірно, поряд із збідненими вуглецем його ділянками (поблизу карбідів) зберігаються ділянки мартенситу з вихідним вмістом вуглецю. Перше перетворення з дуже малою швидкістю протікає без нагрівання сталі. Зниження кількості розчиненого вуглецю зумовлює зменшення тетрагональності ґрат мартенситу. Зовні це проявляється в скороченні довжини зразків сталі.

*Друге перетворення при відпуску* протікає в інтервалі температур 200—300 °С. В цьому інтервалі температур розпад залишкового аустеніту відбувається за механізмом бейнітної реакції: утворюється суміш кристалів маловуглецевого мартенситу та дисперсних карбідів. Це позначається на видовженні зразків (зменшенні густини сталі), тим більшому, чим більше залишкового аустеніту було в загартованій сталі,  $\epsilon$ -карбіди поступово перетворюються на цементит.

В завершенні другого перетворення при 300 °С закінчується виділення вуглецю з  $\alpha$ -розчину й утворюється цементит  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Зменшуються внутрішні напруження в сталі. Структура сталі, що сформувалася при її нагріванні до 400 °С, складається з феритно-цементитної суміші високого ступеня дисперсності. Сума цих змін характеризує *третє перетворення при відпуску сталі*.

Подальше підвищення температур приводить до збільшення зерен фериту і цементиту (коагуляція). *Четверте перетворення при відпуску* – це процес коагуляції карбідних зерен, який починається при низьких температурах відпуску і більш інтенсивніше протікає при температурах вище 400 °С.

Таким чином, залежно від температури нагрівання сталі під час її відпуску утворюються структури мартенситу, бейніту, троститу або сорбіту відпуску. Структури відпуску трохи відрізня-

ються від структур гартування і більш сприятливі для експлуатації деталей.

Легуючі елементи в сталі впливають на дифузійну рухливість атомів, тому термообробка легованих сталей має деякі особливості. Загартована сталь набуває не лише підвищеної міцності та твердості, а й схильності до крихкого руйнування. Тому після її гартування з метою підвищення в'язкості та усунення гартівних напружень обов'язково виконують відпуск сталі. Температура відпуску впливає на межу міцності та пластичності, твердість, відносні видовження та звуження, а також на ударну в'язкість сталі. Зміну механічних властивостей, наприклад сталі 45, після гартування при різних температурах відпуску показано на рис. 2.19.

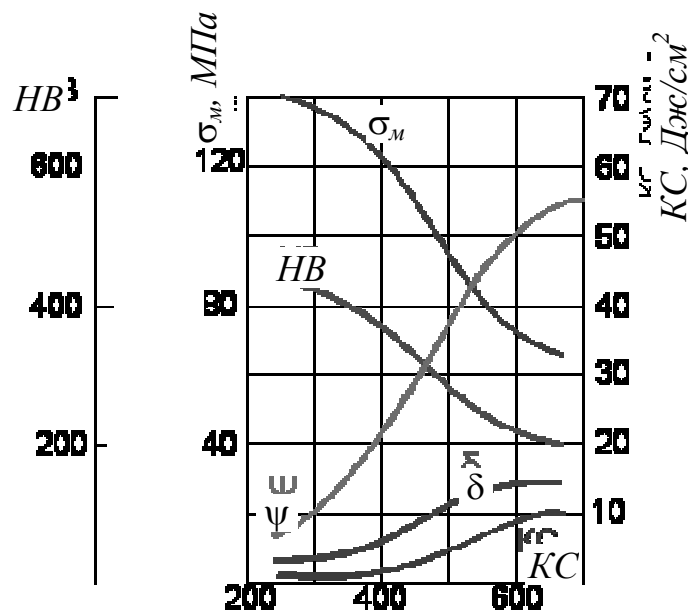


Рис. 2.19. Вплив відпуску сталі 45 на її механічні властивості

Графік демонструє, що міцність вуглецевої сталі зменшується з підвищенням температури відпуску, а характеристики її пластичності поліпшуються. Ударна в'язкість КС сталі інтенсивно зростає при температурах відпуску, вищих за 300 °C, і набуває

максимального значення при температурі 600 °С. Сталь 45 при цьому має сорбітну структуру, а отже, найкращу ударну в'язкість.

Твердість, межа міцності та пластичності загартованої без відпуску та відпущеній при температурі 200 °С сталі практично однакові. Тому з урахуванням термічних напружень можна підвищувати швидкість охолодження відпущених деталей в межах, коли не проявляється небезпечна дія напружень.

Режим відпуску вибирають залежно від марки сталі, маси виробів і вимог до їхніх механічних властивостей. Температура нагрівання виробу визначається видом відпуску, а нагрівання рекомендується виконувати плавно та рівномірно. Найкраще вироби завантажувати в холодну піч і нагрівати їх із швидкістю приблизно 50...100 °С/год. На якість відпуску впливає тривалість витримки, яку визначають такою, щоб забезпечувалася стабільність властивостей виробів. Тривалість витримки має становити приблизно 2...3 хв. Практично тривалість низького відпуску, наприклад інструментів із сталі, становить 0,5...2 год., але тривалість відпуску при температурі 100...120 °С, коли спад твердості небажаний, збільшують до 15 год. Такий тривалий відпуск виключає появу наступних об'ємних змін при експлуатації інструмента. При середньому та високому відпусках витримку призначають у межах 1...8 год. для деталей масою понад 200 кг.

Структура відпущеної сталі формується в період витримки при температурі відпуску, тому інтенсивність наступного охолодження не зумовлює яких-небудь змін у ній. Як правило, після відпуску деталі охолоджують на повітрі.

На практиці режимні параметри відпуску сталі визначають за довідниками, а також за спеціальними номограмами, в яких взаємно пов'язані між собою процентний вміст вуглецю в сталі, температура нагрівання, тривалість витримки та твердість HRC.

Користуючись номограмою, можна визначити твердість вуглецевої сталі, відпущеної за певним режимом.

## 2.5. Старіння сталі

*Старінням* металів та їх сплавів називають процеси, що відбуваються повільно, без впливу зовнішнього середовища, а протягом певного часу призводять до зміни їхніх властивостей. Такими є процеси зміни напружень у масивних чавунних виливках під час зберігання їх протягом довгого періоду на складах, зміни механічних властивостей і розмірів загартованих деталей та інструментів, зміни структури металу загартованих деталей, внаслідок чого підвищується твердість та зменшується пластичність металу. Можливими є випадки короблення виробів як наслідок зміни об'єму і їх розмірів.

Зміцнення металу при старінні є наслідком виділення з перенасиченого твердого розчину вторинних фаз у високодисперсному стані. Надмірні компоненти виділяються в складі субмікроскопічних включень по тілу чи в межах зерен, які ускладнюють переміщення дислокацій. Здебільшого старіння супроводжується різким спадом пластичності та ударної в'язкості металу, що є абсолютно недопустимим.

Причиною старіння залізовуглецевих сплавів є утворення при їх швидкому охолодженні перенасиченого розчину вуглецю й азоту в залізі. Наприклад, при температурі 727 °С у фериті розчиняється 0,025 % С, а при кімнатній — всього лише 0,006 %. У процесі старіння надмірний вуглець (азот) виділяється у вигляді дрібнодисперсних скупчень карбідів або нітридів. Причиною старіння загартованих середньо- та високовуглецевих сталей може



стати поступове перетворення залишкового аустеніту на мартенсит.

Процес зміцнення металу внаслідок виділення в ньому вторинних фаз називається *дисперсійним старінням*, або *твердінням*. Якщо старіння сталі відбувається після її термообробки, його називають *термічним*.

Найбільш схильними до дисперсійного старіння є низьковуглецеві сталі з вмістом вуглецю 0,03...0,05 %, а також особливо киплячі сталі (розкислені тільки манганом), що мають підвищений вміст розчинених газів (азоту, кисню тощо). З підвищенням вмісту вуглецю схильність сталі до старіння зменшується.

Деякі сталі мають схильність до старіння в наклепаному стані (після вальцювання, гнуття та інших операцій холодної пластичної деформації) навіть після невеликих ступенів обтиснення. Це пояснюється прискоренням процесів розмежування компонентів твердого розчину, які приводять до утворення скупчень атомів розчиненого компонента (а потім і виділень) біля дислокацій. Цей процес не має безпосереднього зв'язку з діаграмою стану сплаву і називається *деформаційним старінням*.

Швидкість процесу зміцнення сталі залежить від її температури (рис. 2.20). За зовнішньої температури максимального зміцнення при старінні сталь може досягти за досить тривалий час (крива I) — від десятків годин до багатьох місяців.

Однак уже при температурі 50 °C для цього вистачає кількох годин (крива II). Нагрівання ж такої сталі до температури 100...300 °C веде до зменшення її твердості (штрихові криві на рис. 2.20), тобто відбувається відпуск сталі.

Процес старіння сталі при зовнішній температурі називається *природним*, а якщо процес відбувається при нагріванні до високих температур — *штучним*.

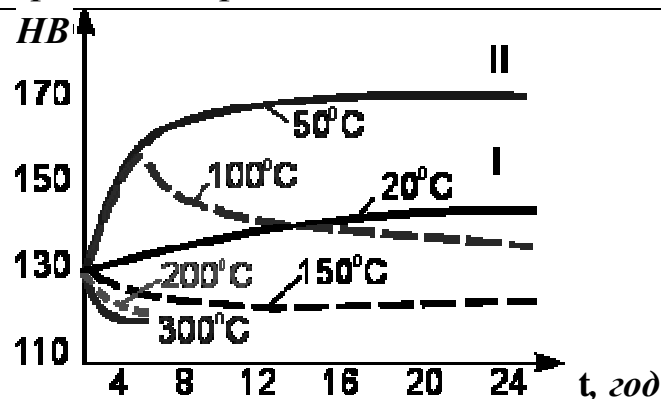


Рис. 2.20. Зміна механічних властивостей загартованої сталі при її старінні

Природне старіння сталі — небажане явище. Крихкий після тривалого зберігання автомобільний чи котельний сталевий лист стає непридатним для виготовлення з нього виробів холодним штампуванням. Старіння — одна з причин утворення кільцевих тріщин на трубах з низьковуглецевої сталі в місцях їх розвальцювання та гнуття.

Деякі деталі під час експлуатації нагріваються і в них відбувається коагуляція фаз з відповідним зниженням міцності. Такі деталі піддають старінню з метою отримання рівня їхніх властивостей, які залишаться стабільними за умов експлуатації деталей. Таке старіння сталі називається *стабілізацією*.

Для відновлення пластичності сталі перед її холодною пластичною деформацією застосовують відпал. З метою зберігання сталості розмірів та попередження короблення деталей під час експлуатації перед кінцевими операціями обробки застосовують термообробку. Такий процес термообробки називається старінням і поділяється на природне та штучне.

Природне старіння здійснюється зберіганням деталей на відкритому повітрі тривалістю не менше трьох місяців. Штучне старіння полягає в нагріванні деталей до температури, яка не повинна бути більшою від температури низького відпуску, тривалій

витримці її при цій температурі та повільному охолодженні до зовнішньої температури. Найкраще старіння виконувати з нагріванням до температури 125...200 °С в печі чи мастильній ванні з витримкою до 8...15 годин, іноді до 25...30 годин та подальшим охолодженням разом із піччю. Штучним старінням можна стабілізувати напруження в деталях і зберегти їхню високу твердість після гартування.

У низьковідпущених сталях з підвищеним вмістом вуглецю протягом тривалого часу можуть продовжуватися процеси розпаду мартенситу та перетворення залишкового аустеніту на мартенсит, що зумовлює зміну їхніх властивостей. Як зазначено вище, негативний вплив залишкового аустеніту усувають обробкою сталі холодом. Стабілізацію мартенситу здійснюють за допомогою тривалого низького відпуску сталі. Температура стабілізації вуглецевої і низьколегованої сталей становить 120 °С, тривалість нагрівання — 200 годин; температура стабілізації високолегованої сталі — 160 °С, тривалість її нагрівання — до 500 годин.

## 2.6. Загартованість і прогартованість сталі

У процесі гартування швидкість охолодження по розрізу деталі неоднакова: на поверхні вона більша, всередині менша. Розподіл швидкості охолодження по розрізу деталі залежить від теплопровідності сталі та швидкості охолодження її поверхні.

Наскрізне гартування по всьому розрізу деталі відбувається тоді, коли швидкість охолодження  $V_{ох}$  всередині розрізу буде вища від критичної  $V_{кр}$  (рис. 2.21), і всередині деталі — структура перлітного типу (рис. 2.22). Тому в зовнішньому шарі деталі будуть досягнуті високі твердість та міцність, а серцевина залишиться більш пластичною.

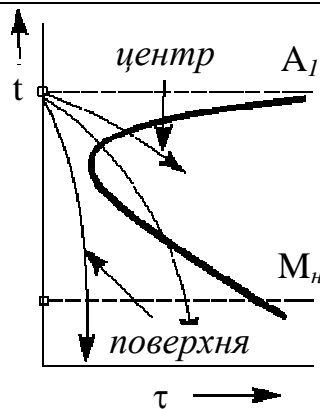


Рис. 2.21. Схеми, що показують різну швидкість охолодження по розрізу виробу

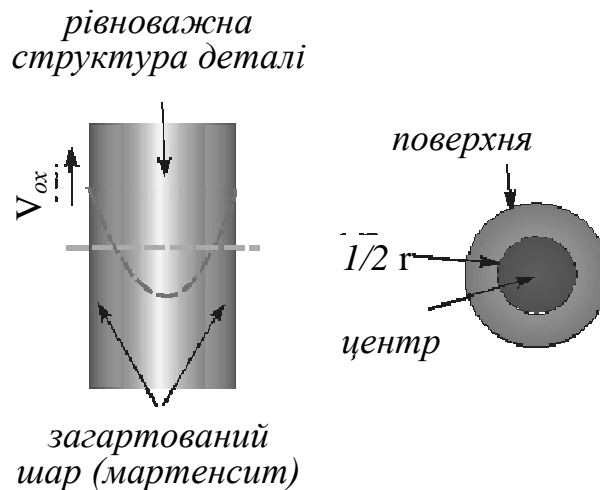


Рис. 2.22. Схеми, що показують виникнення різних структур по розрізу виробу

Деталі з великим поперечним розрізом охолоджуються повільніше, ніж дрібні. Тому глибина загартованого шару із збільшенням поперечного розрізу деталі зменшується.

Здатність сталі при гартуванні отримувати мартенситну структуру в шарі тієї чи іншої глибини називається її *прогартованістю*.

Прогартованість сталі характеризують критичним діаметром. Це максимальний діаметр циліндричного зразка, що прогартувався наскрізь в охолоднику.

Швидкість охолодження зануреної в охолодник сталі по її розрізу неоднакова. Максимальна швидкість охолодження досягається на поверхні деталі, зменшуючись у напрямку до її серцевини (рис. 2.22). На рисунку симетричною штриховою лінією зображено зміну швидкості охолодження  $V_{\text{ох}}$  по розрізу деталі, а горизонтальною — критичну швидкість охолодження  $V_{\text{кр}}$ .

При швидкості охолодження, меншій за критичну, аустеніт розпадається на феритно-цементитну суміш, і гартування не буде наскрізним. Структура по розрізу деталі визначається за С-подібними кривими діаграми ізотермічного перетворення сталі. На поверхні деталі утворюється мартенсит, глибше — мартенсит і троостит, далі вглиб — троостит та сорбіт, а в центрі — рівноважна вихідна структура деталі.

Таким чином, сталі з низькою критичною швидкістю охолодження мають більшу прогартованість, а з високою — меншу. Для кожного охолодного середовища та марки сталі існує свій критичний діаметр прогартованості. Так, у сталі 40 критичний діаметр при охолодженні у воді становить 10 мм, а в мастилі — 8 мм. Щоб уникнути у визначенні прогартованості сталі залежності від типу охолодника, введено поняття *ідеального критичного діаметра*. Це діаметр найбільшого циліндра, який при його охолодженні з ідеальною швидкістю (поверхня охолоджується з необмежено високою швидкістю) від температури гартування до зовнішньої температури прогартується наскрізь. За ідеальним критичним діаметром прогартованості можна порівнювати сталі.

Критичний діаметр прогартованості — дуже важлива і зручна технологічна характеристика для визначення режиму гартування сталевих виробів. Знаючи один із критичних діаметрів при гартуванні виробу у воді чи мастилі та використовуючи відповідні номограми, можна визначити інші охолодники й установити режим термообробки, що забезпечує наскрізне гартування виро-

бу. Деталі з розмірами, меншими від критичного діаметра, прогартуються в заданому охолоднику наскрізь.

На прогартуваність сталі впливає її хімічний склад. Леговані сталі характеризуються вищою прогартуваністю, ніж вуглецеві. Легуючі елементи, особливо хром, молібден і манган, збільшують прогартуваність сталі. Прогартуваність сталей визначають експериментально. Простий і надійний метод — це стандартний метод торцевого гартування.

Прогартуваність сталі однієї і тієї самої марки залежить також від незначної зміни її хімічного складу, розмірів зерна аустеніту (температури нагрівання для гартування), розмірів та форми деталі тощо і коливається в широких межах. У зв'язку з цим у довідниках прогартуваність сталі кожної марки характеризують не кривою, а смугою прогартуваності (рис. 2.23).

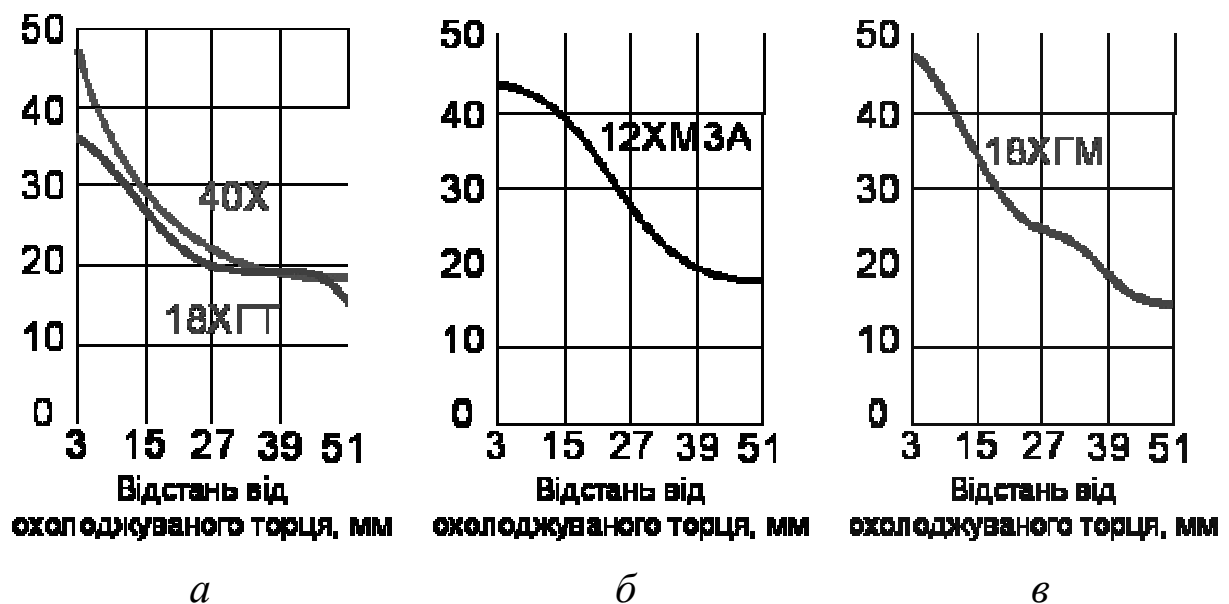


Рис. 2.23. Смуги прогартуваності сталі 40X, 18XГТ(а) та сталі 12ХМ3А, 18ХГМ (б, в)

Прогартуваність — це важлива конструкційна характеристика сталі. Знання критичного діаметра прогартуваності дозволяє

зробити правильний вибір сталі для деталей певних розмірів та призначення, яким передбачається зміцнення термообробкою. Якщо потрібна висока міцність по всьому перерізу деталі, то треба забезпечити її повну прогартованість.

Поряд із прогартованістю важливою характеристикою сталі є її *загартованість* — здатність внаслідок гартування набувати великої твердості. Загартованість визначається в основному вмістом вуглецю в сталі. При збільшенні вуглецю з 0,3 до 0,7 % твердість вуглецевої сталі зростає з 30 до 65 HRC. Подальше збільшення вмісту вуглецю не дає зростання твердості сталі. Низьковуглецеві сталі (до 0,2 % C) практично не загартовуються, оскільки їхня твердість при гартуванні не підвищується. Загартованість збільшують легуванням сталі нікелем, манганом, хромом, кремнієм.

## 2.7. Внутрішні напруження при гартуванні сталі

Внаслідок фазових і структурних перетворень у сталі, зумовлених тепловою дією на метал, змінюється об'єм загартованої сталі та з'являються внутрішні напруження. Ці напруження можуть бути значними, іноді такими, що утворюють різні дефекти, які спричиняють брак, а процес гартування стає важкою та небезпечною операцією. Внутрішні напруження в сталі можуть бути *термічними* і *структурними*. Перші є наслідком нерівномірності охолодження поверхні та серцевини деталі, другі — наслідком неодночасного перетворення аустеніту на мартенсит на поверхні й у серцевині деталі.

Під час нагрівання вище критичних температур  $A_1$ — $A_3$  в першу чергу нагріваються кути ребер куба (рис 2.24).

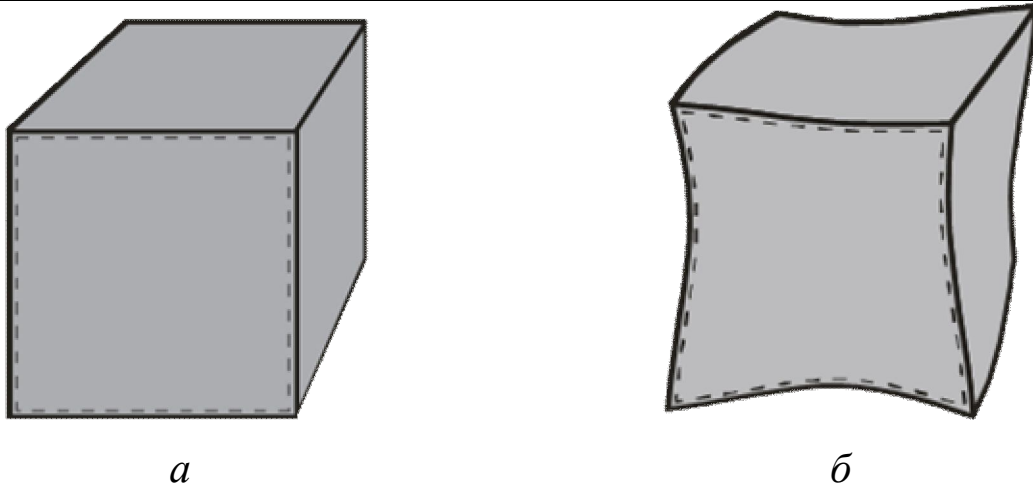


Рис. 2.24. Деформація сталевих деталей при її нагріванні

Нагріті ділянки розширюються, але ще холодна серцевина куба перешкоджає його видовженню, і деталь деформується (рис. 2.24, б). У процесі подальшого нагрівання деталі, коли нагрівається її серцевина, деформація усувається, а деталь набуває вихідної форми (рис. 2.24, а).

Проте при охолодженні в металі виникають внутрішні напруження зворотного характеру. Якщо їхні значення перевищать межу міцності металу, то в ньому виникнуть тріщини. Щоб якісно виконати термообробку деталі, необхідно враховувати особливості її форми та вплив останньої на появу напружень при нагріванні й охолодженні деталі.

Під час гартування сталі не може бути одночасного та рівномірного охолодження, а значить, і відповідно зміни об'єму виробу. Поверхневі шари скорочуються раніше, ніж внутрішні, оскільки вони охолоджуються швидше. Цей процес спричинює появу в них розтяжних напружень, тому що внутрішні шари не допускають стиснення зовнішніх, а серцевина при цьому буде стискатися, зазнаючи напруження стиснення. Такого виду напруження, зумовлені зміною об'єму металу під час його нагрівання або охолодження, є *теповими*, або *термічними*.



Структурні чи фазові напруження виникають внаслідок зміни об'єму сталі при перекристалізації аустеніту та переході його в мартенсит й інші структури. Найсильніше вони проявляються при утворенні мартенситу, що має найбільший питомий об'єм. Структурні напруження можуть додаватися до термічних. Залежно від знака напружень сумарне значення їх може зменшуватися чи збільшуватися. Взагалі конкретне визначення напружень є складною проблемою. Структурні напруження можуть зруйнувати виріб через кілька годин або днів після їх гартування. Для усунення небажаної дії напружень слід вживати заходів після гартування виробу.

Напруження, що виникають під час охолодження сталі, називають *тимчасовими*, а після повного її охолодження — *залишковими*. Відпуск загартованої сталі веде до зниження напружень. Значення залишкових напружень залежить від швидкості охолодження та температури відпуску сталі.

## **2.8. Види браку після термічної обробки та способи їх усунення**

При неправильних режимних умовах гартування сталі виникають різні дефекти в деталях і навіть брак продукції. До них належать:

- тріщини;
- короблення;
- знеуглецювання;
- недогрівання;
- перегрівання;
- м'які плями;
- низька твердість;

- грубозернистість структури;
- перепал;
- плямисте гартування.

*Гартівні тріщини* є невиправним дефектом — браком гартування сталі. Вони виникають в основному внаслідок нерівномірних змін об'єму по перерізу деталі та збільшення її об'єму під час гартування на мартенсит. Тріщини утворюються внаслідок дії внутрішніх напружень, вищих за межу міцності металу. Тому гартування необхідно проводити за режимом, який забезпечує рівень напружень у межах норми. Тріщини поділяють на глибокі, внутрішні, поверхневі та тріщини відшарування.

Деформація деталі, що виникає під час її *короблення*, спостерігається при значних термічних і структурних напруженнях. Для усунення цих дефектів слід правильно виконувати способи гартування сталі, а також охолоджувати деталі в штампах, пресах та пристроях, які не дають змоги змінюватися об'єму та формі, тому що деталь перебуває в затисненому стані і цим захищається від деформації.

*Зневуглецювання* — часткове випалювання вуглецю в поверхневих шарах металу. Щоб не допустити зневуглецювання та окиснення під час термообробки сталевих виробів, їх нагрівання треба проводити в печах із захисною атмосферою або в соляних ваннах, добре розкислених введенням розкислювачів (бури, фтористого магнію тощо).

*Недогрівання, перегрівання та перепал* виникають при неправильному режимі нагрівання деталі. Такі дефекти термообробки, як недогрівання і перегрівання деталі, ліквідують повторним нормальним її відпалюванням або нормалізацією.

*М'які плями* — місцевий дефект на поверхні деталей, що характеризується пониженою твердістю. Спостерігається на забруднених ділянках поверхні деталі, в місцях з окалиною, зневугле-

цьованих ділянках або тоді, коли в процесі охолодження деталі не досить енергійно рухались у гартівній рідині. Цього можна уникнути струминним гартуванням деталей чи їх гартуванням у підсоленій воді.

*Плямисте гартування* виникає внаслідок нерівномірного охолодження деталей, дотикання їх одна до одної під час гартування та від утворення м'яких плям.

*Низька твердість* сталі може бути наслідком не досить високої швидкості її охолодження під час гартування, недогрівання та недостатньої витримки в печі або ванні. Виправити цей дефект можна застосуванням високого відпуску сталі.

*Грубозерниста структура сталі* — дефект, що утворюється внаслідок завищення температури її нагрівання. Виправити цей дефект можна використанням високого відпуску сталі.

## 2.9. Види браку при відпуску сталі

Під час відпуску сталі відбуваються деформація та зміна розмірів деталей, пов'язані з появою внутрішніх напружень, що супроводжують фазові перетворення. Деформація сталі під час її відпуску значно менша, ніж після гартування, однак може бути причиною появи браку.

Здебільшого відпуск сталевих виробів призначають перед виконанням заключних формозмінювальних операцій технологічного процесу. Тому можливі незначні зміни геометричної форми сталевого виробу після відпуску можна усунути, передбачивши відповідні припуски на кінцеву його обробку.

Суттєве короблення, а також тріщини можуть виникнути внаслідок тривалої перерви між гартуванням і відпуском сталі.

Для запобігання цим дефектам рекомендується скорочувати тривалість перерви між гартуванням і відпуском сталі.

Найпоширенішим видом браку при відпуску сталі є невідповідність її твердості технічним умовам. Недостатня твердість відпущених деталей може бути зумовлена застосуванням зниженої температури гартування, внаслідок чого утворюється недостатньо легований мартенсит, або підвищеної температури відпуску. Цей дефект усувають відпалом сталі з наступними повторним її гартуванням і відпуском відповідно до заданого режиму обробки.

Причиною завищеної твердості сталі найчастіше бувають недостатня температура її відпуску чи недостатня тривалість витримки сталевих виробів у печі, коли процеси формування потрібних структур і властивостей ще не завершилися. Виправити цей дефект можна повторним відпуском сталі при певній температурі.

Невідповідність твердості сталі технічним умовам усувається відпалом з наступним її гартуванням і відпуском.

## МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 3.1. Поверхнєве гартування

Деталі машин під час роботи зазнають одночасно значного тертя та ударних навантажень. Такі умови роботи вимагають, щоб поверхневий шар металу деталей мав високу твердість і зносостійкість і в той же час м'яку та в'язку серцевину, яка добре сприймала б опір ударів (рис 3.1).

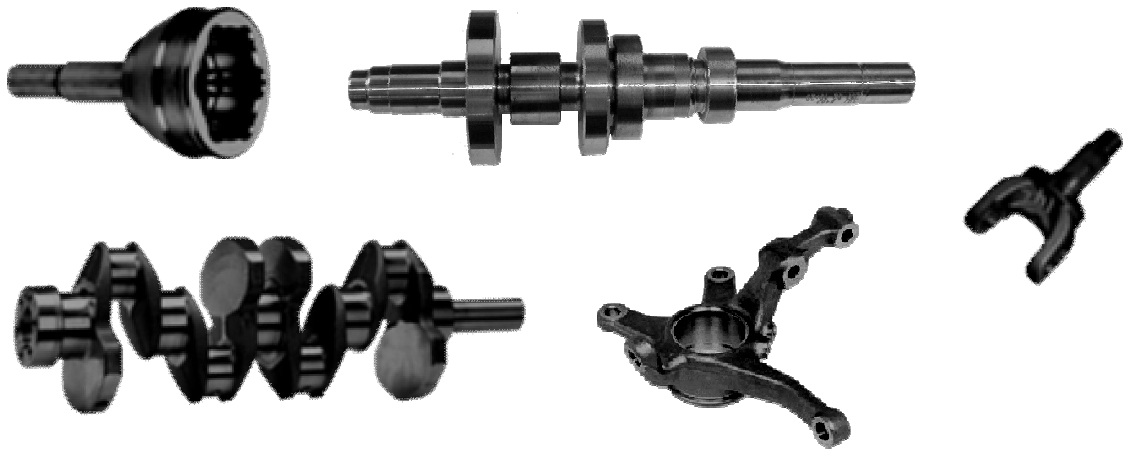


Рис. 3.1. Деталі машин

Таких властивостей можна надати виробу поверхневим гартуванням, тобто нагрівом та охолодженням лише поверхневого шару.

Переваги поверхневого загартування:

- поверхнєве загартування належить до процесів, що відбуваються дуже швидко;
- вирішує проблеми термообробки великогабаритних елементів конструкцій;

- забезпечує місцеву термообробку виробів.

Застосування поверхневого гартування замість звичайного підвищує продуктивність праці та знижує собівартість продукції.

### 3.2. Індукційне високочастотне гартування

При поверхневій обробці струмами високої частоти (СВЧ) досягається підвищення твердості виробів на 6...8 НРС порівняно з гартуванням аналогічних виробів у печах.

Підвищена твердість пояснюється не особливостями фазових перетворень при індукційному нагріванні сталі, а її охолодженням у мартенситному інтервалі з великими швидкостями, що запобігає відпуску мартенситу при гартуванні та фіксує високу масову частку вуглецю у твердому розчині.

Для нагрівання виробів застосовують струми ВЧ (5...10000 кГц), які пропускають через провідник, виготовлений у вигляді соленоїда (рис. 3.2). Останній генерує пульсуюче магнітне поле, яке індукує струм тієї самої частоти (вихрові струми Фуко) в розташованому поблизу соленоїда виробі.

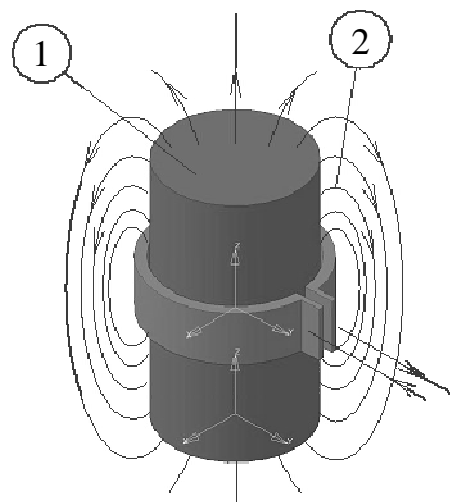


Рис. 3.2. Індуктор і його магнітне поле: 1 — виріб, 2 — магнітне поле

За законом Джоуля-Ленца при проходженні електричного струму в провіднику виділяється теплота, тому температура поверхневого шару виробу зростає.

## 2.1. Принцип дії високочастотного нагрівання виробів

Конструкція індукторів обумовлена формою поверхні та розмірами виробу, тому для кожного виробу виготовляють відповідний індуктор. Під час нагріву між індуктором і виробом має бути проміжок у 2—3 мм.

Для гартування дрібних виробів при нагріванні на глибину до 2 мм застосовують струми з частотою 5—100 кГц, а для великих виробів при нагріванні на глибину більше 2...3 мм застосовують струми з частотою 0,5—15 кГц, який пропускають через провідник, виготовлений у вигляді соленоїда (рис. 3.3).

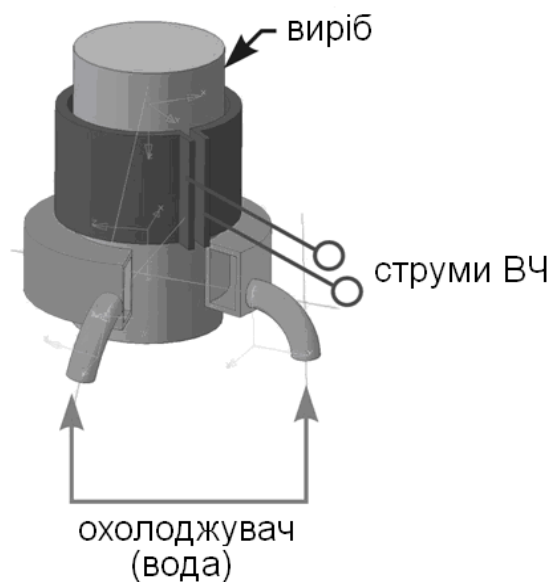


Рис. 3.3. Установка для високочастотного нагрівання виробів

### 3.2.2. Особливості при нагріванні струмом ВЧ

При нагріванні феромагнітних матеріалів (сталі та чавунів), після досягнення точки Кюрі (730—770 °С) їх відносна магнітна проникність різко спадає від 50—100 до 1, тому глибина проникнення вихрових струмів різко збільшується і це необхідно враховувати при визначенні режимних параметрів роботи установок СВЧ. При цьому поверхневий шар швидко досягає заданої температури, а його серцевина залишається не нагрітою.

Кількість теплоти (Дж), потрібної для нагрівання сталевого виробу, визначається залежністю:

$$Q = I^2 R t,$$

де  $I$  — сила струму, А;  $R$  — електричний опір сталі, Ом;  $t$  — тривалість нагрівання, с.

Струм концентрується в основному на поверхні, а його густина зменшується до центра виробу. Цю властивість СВЧ називають поверхневим ефектом, або скін-ефектом.

Найбільшу густину струму матиме поверхневий шар виробу, в якому виділяється приблизно 90 % теплової енергії. Цей шар називають глибиною ( $\delta$ ) проникнення струму в метал. Густиною струму нижче поверхневого шару можна знехтувати, якщо вона менша приблизно у три рази від густини струму в поверхневому шарі. Глибина проникнення струму (см) в метал визначається залежністю:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}},$$

де  $\rho$  — питомий електричний опір металу, Ом·м;  $\mu_r$  — відносна магнітна проникність металу;  $f$  — частота струму, Гц.

Глибина проникнення струму залежить від матеріалу і температури виробу та частоти струму (таблиця 3.1).



Таблиця 3.1. Глибина проникнення струму, см

Частота струму, Гц	Мідь при 15 °С	Сталь при 15 °С	Сталь при 850 °С
50	1,0	0,22	9,14
2 000	0,15	0,05	1,45
10 000	0,07	0,02	0,65
100 000	0,02	0,007	0,21
1 000 000	0,007	0,002	0,065

Аналіз значень (таблиця 3.1) показує, що глибина проникнення струму збільшується при підвищенні температури металу і досягає її максимального значення в момент втрати магнітних властивостей (точка Кюрі). Таку глибину проникнення струму називають “гарячою”, а глибину проникнення струму при кімнатній температурі — “холодною”.

Із графіка індукційного нагрівання сталевого виробу спостерігається, що швидке нагрівання виробу відбувається при температурах до точки Кюрі, а при більш високих температурах швидкість нагрівання виробу сповільнюється (рис. 3.4).

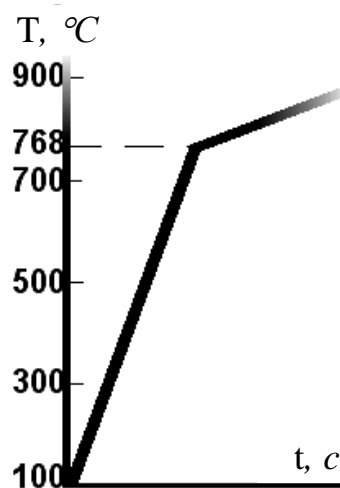


Рис. 3.4. Графік індукційного нагрівання сталевого виробу

В зоні, де закінчується вплив “гарячої” глибини проникнення струму, нагрівання відбувається лише завдяки теплопровідності. Такі операції нагрівання називають поверхневими.

Розподіл температури по перерізу виробу при глибинному та поверхневому нагріванні металу різний.

При пічному нагріванні зміна температури контролюється теплопровідністю сталі, її прогрівання відбувається повільно, близько до рівноважних умов. Тому для визначення температурного режиму можна використати діаграму стану залізо-вуглець.

При нагріванні СВЧ зміна температури пов’язана з генеруванням енергії безпосередньо у поверхневому шарі виробу. В таких умовах треба користуватися спеціальною діаграмою стану, де враховано вплив швидкості нагрівання на кінетику фазових перетворень у сплаві (рис. 3.5).

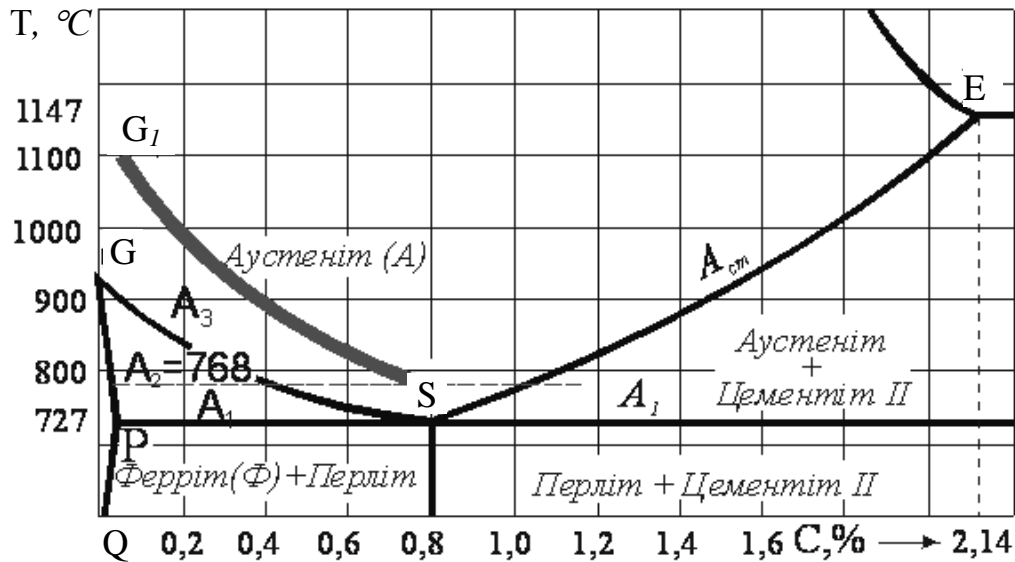


Рис. 3.5. Діаграма стану Fe-Fe<sub>3</sub>C для користування в умовах індукційного нагрівання виробів

Процес перетворення перлиту на аустеніт відбувається дуже швидко 0,1—1 с при  $t = 727$  °C. Підвищення температури

скорочує тривалість перетворення, що дуже важливо для нагрівання СВЧ, а також зменшує ріст аустенітного зерна (таблиці 3.2, 3.3).

**Таблиця 3.2. Температура гартівного нагрівання в печі і струмами ВЧ деяких конструкційних та інструментальних сталей**

Марка сталі	Температура нагрівання в печі, °С	Нагрівання СВЧ із швидкістю, °С/с			
		100	250	400	500
40	840-860	850-900	880-920	930-980	960-1020
45	810-860	830-880	860-910	900-950	930-1000
50	820-840	810-850	830-880	870-920	900-960
40X	850-870	830-880	860-920	900-960	960-1000
50Г	820-840	810-850	830-880	870-920	900-960
У8	790-820	780-820	780-850	780-860	820-920
У12	760-780	780-820	780-850	780-860	820-920

**Таблиця 3.3. Частота струму для індукційного гартівного нагрівання на задану глибину**

Параметр	Глибина загартованого шару, мм						
	1	1,5	2	3	4	6	10
Найвища частота струму, кГц	250	100	60	30	15	8	2,5
Найнижча частота струму, кГц	15	7	4	1,5	1	0,5	0,15
Тип генератора	ламповий			машинний			
				8-10 кГц	2,5 кГц	2,5-1 кГц	0,5 кГц

### **3.3. Газополуменеве гартування**

Гартування деталей газокисневим полум'ям — один з найбільш доцільних методів поверхневої термічної обробки в умовах одиничного виробництва. У випадку газополуменевого нагрівання застосовують пальники, за допомогою яких нагрівають поверхні виробу полум'ям від спалювання ацетилену, природного газу, парів гасу, бензину або іншого горючого газу в суміші з киснем. Дуже важливою особливістю газового полум'я є можливість регулювання в широких межах його окисно-відновних властивостей зміною співвідношення кисню і горючого газу, що подаються в пальник.

Газополуменеве нагрівання використовують для здійснення таких видів термічної обробки:

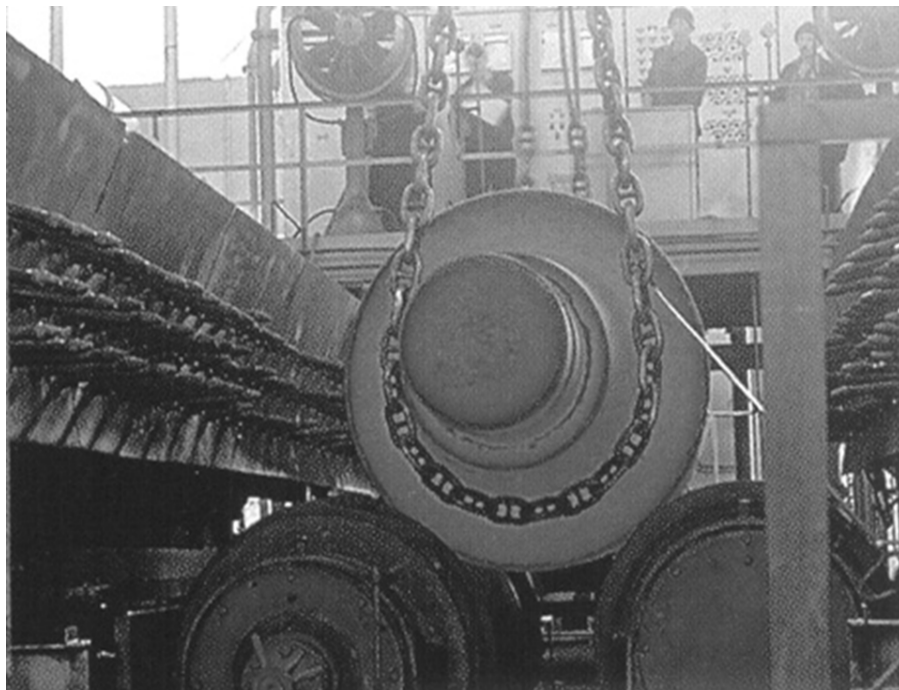
- поверхневого гартування виробів;
- місцевого відпалу, нормалізації, відпуску для поліпшення структури та властивостей металу виробів (зокрема, зварних з'єднань) і створення можливостей для механічної обробки;
- місцевого відпуску для зняття або перерозподілу внутрішніх напружень (частіше в зварних конструкціях);
- поверхневої очистки виробів та конструкцій.

Вода для охолодження поверхні деталі подається за допомогою душового пристрою. Загартовані деталі піддають відпуску в печі при 180...250 °С. Газополуменеве нагрівання може відбуватися при нерухомому положенні деталі з поступовим переміщенням пальника або при нерухомому положенні пальника із зустрічним рухом деталі. Товщина загартованого шару становить 2...4 мм, а його твердість для сталі із вмістом вуглецю 0,4...0,45 % становить 50...56 HRC. До недоліків способу поверхневого загартування відносять недостатнє регулювання температури й товщини загартованого шару, а також можливість перегріву окремих ділянок поверхні деталі.

Указані недоліки усунені на установці для поверхневого зміцнення прокатних валків діаметром до 1600 мм, впровадженій на Новокраматорському машинобудівному заводі (рис. 3.6, 3.7).



*Рис. 3.6.* Установа для поверхневого зміцнення прокатних валків



*Рис. 3.7.* Завантаження прокатного валка в охолоджувальну установку



Рис. 3.8. Охолодження прокатного валка водним душем

Валок після попереднього нагрівання до 400...500 °С піддається швидкісному газополуменовому нагріванню до 900...950 °С поверхневого шару в установці на глибину до 150 мм. При нагріванні відбувається контроль температури поверхні й автоматичне регулювання інтенсивності нагрівання відповідно до розробленої технології. По закінченні нагрівання прокатний валок передається в спеціальну охолоджуючу установку (рис. 3.8).

### 3.4. Хіміко-термічна обробка (ХТО)

Хіміко-термічна обробка — це тепловий процес насичення нагрітої поверхні металу вуглецем, азотом, алюмінієм, хромом та іншими елементами з метою цілеспрямованої зміни складу, структури і властивостей поверхневого шару деталі. Цей вид обробки застосовують, коли необхідно дістати більш тверду, стійку до спрацювання деталь із поліпшеними механічними властивостями

та підвищеною корозійною стійкістю і червоностійкістю поверхневого шару.

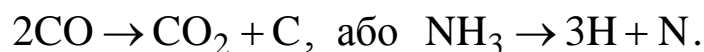
Зміцнення поверхневого шару деталі досягається зміною його хімічного складу. Залежно від елементів, що дифундують у поверхневий шар сталі, розрізняють такі види її хіміко-термічної обробки: цементацію, азотування, ціанування та дифузійну металізацію (алітування, силіціювання тощо).

Хіміко-термічна обробка сталі відрізняється від розглянутих вище способів її обробки тим, що процес обробки поверхні деталі відбувається при її взаємодії з яким-небудь компонентом, який змінює хімічний склад сталі внаслідок безпосередньої його дифузії (проникнення в поверхню деталі) в чистому вигляді або хімічної взаємодії металу з хімічно активними речовинами. Проникнення в поверхню деталі елементів можливе лише тоді, коли елемент, що дифундує, здатний розчинятися в  $\gamma$ - чи  $\alpha$ -залізі, тобто утворювати з основним металом твердий розчин або хімічні сполуки.

Основними параметрами хіміко-термічної обробки сталі є температура і тривалість насичення, а основними процесами, які забезпечують утворення дифузійного поверхневого шару, — дисоціація, адсорбція та дифузія. Під час хіміко-термічної обробки сталі ці процеси відбуваються одночасно.

### 3.4.1. Основні процеси, що відбуваються при ХТО

Дисоціація — розпад молекул з утворенням насичувального елемента в активному атомарному стані, наприклад:



Утворення активних атомів може відбуватися в насичувальному середовищі біля поверхні металу або безпосередньо на ній. Кількість активних атомів, що утворюються за одиницю часу, залежить від складу сталі й агрегатного стану середовища. Утворення активного хімічного елемента, який дифундує в атомарному стані, відбувається внаслідок хімічних реакцій і випаровування. Проте в деяких випадках ці процеси можуть не відбуватися, якщо атоми насичувального елемента надходять безпосередньо з розплаву.

Адсорбція (сорбція) — складний процес поглинання поверхнею сталі атомів елемента, яким насичується деталь. Розрізняють два процеси адсорбції, що накладаються один на один під час хіміко-термічної обробки сталі: фізичну (оборотну) і хімічну (хемосорбцію). Фізична дифузія здійснюється завдяки властивості активних атомів насичувального середовища (наприклад, вуглецю) притягуватися атомами металу завдяки дії вандерваальсових сил. Для неї характерною є легка оборотність процесу адсорбції (десорбція). При хемосорбції відбувається взаємодія між атомами насичувального елемента й атомами поверхні металу. За природою та інтенсивністю вона наближається до хімічної.

Адсорбція — екзотермічний процес, що зумовлює зменшення вільної енергії. Вона починається на ділянках металу з максимальною енергією. При збільшенні тиску насичувального середовища кількість адсорбованих атомів зростає. Підвищення температури середовища сприяє адсорбційним процесам.

Дифузія — переміщення адсорбованих поверхнею атомів у кристалічних ґратах насичуваного металу вглиб останнього. Підвищення температури металу прискорює процес дифузії, а також впливає на товщину насиченого шару на поверхні виробу. Чим вища його температура, тим товщий цей шар.



Адсорбція і дифузія можливі за умови, коли метал, що обробляється, та компонент, який дифундує, взаємодіючи, утворюють твердий розчин або хімічні сполуки. У випадку, коли метал та насичувальний елемент утворюють механічну суміш, хіміко-термічна обробка неможлива і поверхня деталі свої властивості не змінює. Це необхідно враховувати при виборі вихідних компонентів, що дифундують.

На розвиток дифузії також впливає тип твердого розчину. Вихідні компоненти, які дифундують й утворюють тверді розчини проникнення (азот, вуглець), здійснюють цей процес значно швидше, ніж компоненти, що утворюють тверді розчини заміщення (хром, алюміній). Швидкість дифузійного процесу в різних типах твердого розчину визначається місцем, яке займає атом, що дифундує, в ґратах цього розчину. У ґратах твердих розчинів заміщення атом займає наявні в металі вакансії або місце атома металу-розчинника, що можливе за умови зміщення атома основного металу з рівноважного стану в дислокований.

Розподіл концентрації речовини, яка дифундує, по глибині металу, що обробляється, залежить від характеру взаємодії атомів дифундованого компоненту і металу. При утворенні розчинів елемента, який дифундує, з оброблюваним металом концентрація дифундованих атомів в глибину зменшуватиметься поступово, монотонно, а при утворенні хімічних сполук, або проміжних фаз змінного складу — стрибкоподібно.

Утворення дифузійної зони залежить від тривалості витримки виробу при стійкій температурі. Глибина дифузійної зони та концентрація компонента, що дифундує в ній, збільшуються в міру підвищення тривалості витримки.

Глибину дифузійної зони залежно від тривалості витримки виробу при сталій температурі визначають за формулою:

$$X = K\sqrt{D\tau},$$

де  $X$  — глибина дифузійної зони;  $K$  — константа;  $D$  — коефіцієнт дифузії;  $\tau$  — тривалість витримки.

Таким чином, для збільшення глибини дифузійної зони в два рази витримку треба збільшити в чотири рази. Фазові та структурні перетворення, які відбуваються у процесі насичення, можна передбачити за допомогою подвійних діаграм стану, якщо в дифузійній взаємодії беруть участь лише два елементи. При цьому припускається, що дифузійний процес не інтенсифікується і дифузійна зона, яка утворюється, перебуває в рівноважному стані.

На рис. 3.9 зображено схему формування структури дифузійного шару при насиченні елемента А елементом В за температури  $T_{\text{диф}}$ . При тривалому дифузійному насиченні ( $\tau$ ) елемента А елементом В можна досягти відповідності фазового складу дифузійної зони рівноважній діаграмі стану (рис. 3.9).

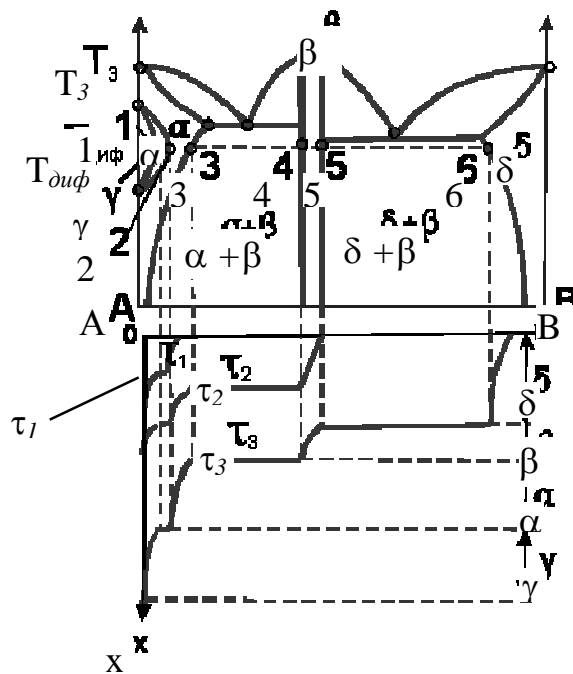


Рис. 3.9. Схема формування структури дифузійного шару відповідно до рівноважної діаграми стану (тривалість витримки  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ )

Послідовність утворення фаз при температурі дифузійного насичення відповідає послідовності їх розташування на діаграмі ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ). В дифузійній зоні вони будуть розташовуватись пошарово від найбільш збагаченої елементом В фази на поверхні металу до найбільш бідної ближче до серцевини. Отже, на поверхні існуватиме шар  $\delta$ -фази, під ним —  $\beta$ -фази, далі —  $\alpha$ -фази й останнім —  $\gamma$ -фази. При зменшенні тривалості насичення в дифузійній зоні будуть відсутніми шари фаз, починаючи з найбільш збагачених компонентом В в тій самій послідовності (рис. 3.9). Проте фази з дуже вузькими зонами гомогенності на діаграмі стану (наприклад,  $\beta$ -фаза) можуть рости так повільно, що їхні шари в дифузійній зоні можуть і не з'явитися. Двофазні шари в дифузійній зоні не утворюються. Їхні складові мають сталий склад, а через фазу сталого складу дифузійне перенесення неможливе у зв'язку з відсутністю градієнта концентрацій.

Двофазний шар у дифузійній зоні може утворитися при повільному охолодженні за температури  $T_{\text{диф}}$ , внаслідок змінної розчинності та вторинних виділень  $\alpha$ - і  $\delta$ -фази. Крім того, двофазна суміш може утворитися в дифузійній зоні, якщо при охолодженні за температури  $T_{\text{диф}}$  можливою є фазова перекристалізація.

Прогнозування будови дифузійного шару в складніших умовах (у сплавах, насичення двома і більшою кількістю елементів) можна здійснити тільки за допомогою сучасних методів моделювання та комп'ютерної техніки.

Залежно від фізико-хімічного складу насичувального середовища розрізняють хіміко-термічну обробку сталі з газової, рідкої, твердої та парової фаз. Найчастіше застосовують перші два методи. При врахуванні природи насичувального елемента і самого процесу розрізняють дифузійне насичення неметалами, дифузійне насичення металами та дифузійне виведення елементів.

Узагальнена класифікаційна схема процесів хіміко-термічної обробки сталі приведена на рис. 3.10.

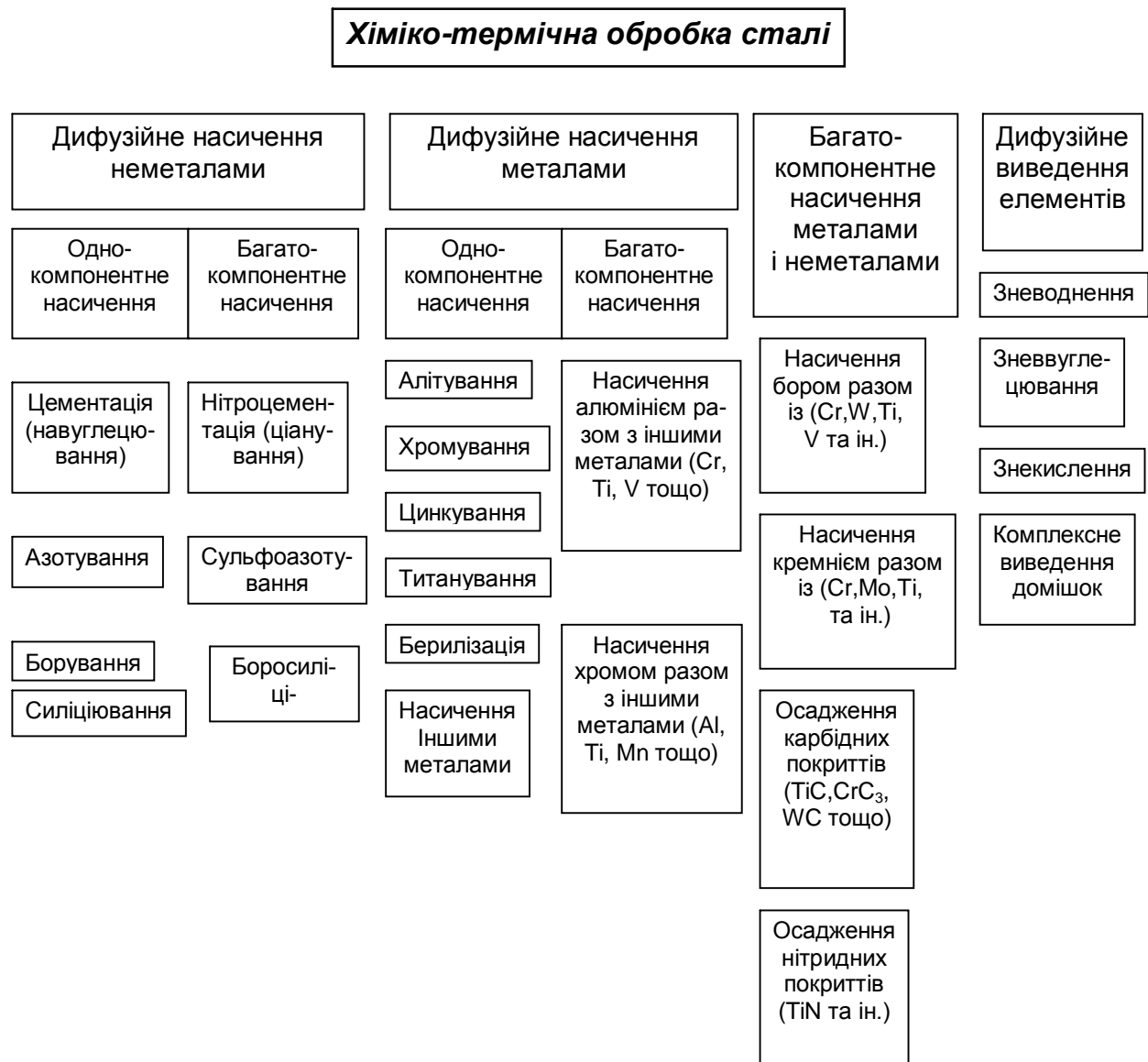


Рис. 3.10. Узагальнена класифікаційна схема процесів хіміко-термічної обробки сталі

Певна річ, узагальнена класифікаційна схема процесів не може охопити всю різноманітність видів хіміко-термічної обробки сталі, які застосовуються в сучасному машинобудуванні.

У машинобудуванні при виготовленні особливо відповідальних деталей найчастіше використовують цементацию,

азотування та ціанування. Поширеність цих досить економічних методів обробки пояснюється вимогами, які ставляться до деталей відносно їхньої міцності й довговічності. Особливо це стосується деталей складної форми, в яких за умовами роботи має бути міцною та твердою поверхня деталі.

Зміцнити зовнішній шар такої деталі поверхневим гартуванням часто буває неможливим, тому й застосовують хіміко-термічну обробку сталі. Дифузійне насичення поверхні деталі із сталі неметалами, такими як вуглець і азот, часто використовують через те, що ці елементи добре розчиняються в залізі, утворюють твердий розчин проникнення, можуть швидко та глибоко проникати в товщину деталі.

### 3.4.2. Цементация

Цементация — процес насичення вуглецем поверхневого шару маловуглецевої (0,1...0,25 %) сталі, нагрітої до температури вище критичної точки  $A_{c3}$  з метою отримання високої твердості поверхні та в'язкої серцевини виробів. Для зміцнення науглецьованого шару вироби піддають гартуванню.

Після цементации змінюються хімічний склад, структура і властивості насиченого вуглецем шару поверхні, підвищуються його твердість, зносостійкість та довговічність, а також корозійна стійкість, та зберігаються в'язкість серцевини деталі й інші властивості.

Цементация в основному застосовується для підвищення зносостійкості деталей машин, що працюють в умовах тертя, наприклад зубчастих коліс, кулачків, розподільних валів, поршневих пальців, штовхачів клапанів, шийок колінчастих валів, черв'ячних коліс, робочих поверхонь вимірювальних інструментів.

Цементують також деталі, які під час роботи витримують високий опір динамічним навантаженням й одночасно працюють на стирання та удар. Цементациї піддають в основному деталі, виготовлені з низьковуглецевих сталей марок 10, 15, 20. Коли ж потрібно забезпечити міцнішу серцевину та стійку до спрацювання поверхню, для виготовлення деталей використовують леговані цементовані сталі з вмістом вуглецю 0,12...0,32 %.

Цементовані сталі повинні мати високі прогартованість і загартованість поверхневого шару для забезпечення потрібної міцності та твердості, а загартованість серцевини регулюється у досить вузьких межах (30...43 HRC). Для досягнення високої в'язкості сталі мають бути спадково дрібнозернистими.

Щоб досягти мінімальної деформації при гартуванні відповідальних деталей та забезпечити достатню прогартованість дифузійного шару і серцевини, застосовують леговані сталі, які гартують охолодженням у мастилi. В той же час кількість легуючих елементів має бути обмеженою, щоб уникнути утворення великої кількості залишкового аустеніту в цементованому шарі при гартуванні сталі. Найчастіше для виготовлення відповідальних деталей (наприклад, шестерень) використовують сталі з титаном (18ХГТ, 30ХГТ), молібденом (25ХГМ), хромонікельмолібденові (20ХНМ, 20ХНГМ) та інші.

Цементация відбувається завдяки контакту оброблюваної поверхні деталі з речовиною, багатою на атомарний вуглець, внаслідок чого поверхня сталі насичується до вмісту вуглецю 0,8 %, а в деяких випадках до 1,2 %. Речовина, збагачена вуглецем, що застосовується під час цементациї сталі, називається карбюризатором.

Карбюризатори бувають тверді, рідкі та газоподібні.

Технологічний процес виготовлення цементованих деталей складається з таких операцій:

- обробка різанням за розміром з припуском на шліфування;
- ізоляція місць, які не повинні цементуватися;
- підготовка необхідного обладнання та карбюратора;
- вибір режиму цементації;
- завантаження в підготовлене обладнання і нагрівання до заданої температури цементації;
- витримка при заданій температурі режиму обробки;
- контроль режиму й умов обробки;
- термообробка після цементації за вибраним режимом;
- кінцева механічна обробка (шліфування та ін.).

Залежно від тривалості витримки та інших параметрів режиму обробки деталей при цементації глибина насичення може сягати 0,5...2 мм, а вміст вуглецю в поверхневому шарі — 1,2 %. Термообробка деталей після цементації (гартування і низький відпуск) забезпечує високу твердість їхнього поверхневого шару при збереженні м'якої та в'язкої серцевини. До того ж вона зумовлює появу на поверхні деталей напружень стиснення. В комплексі це створює високу опірність деталей в умовах тертя, при значних питомих навантаженнях, підвищує витривалість та довговічність деталей.

Після цементації по перерізу деталі встановлюється неоднорідна концентрація вуглецю. Вміст його зменшується від максимального значення на поверхні шару в напрямку серцевини, досягаючи значення, яке має вибрана для цементації сталь. Відповідно змінюється і структура металу. Для цементованих деталей вибирають сталь, що містить близько 0,1 % С. Тому структура повільно охолодженої серцевини буде складатися з фериту і невеликої кількості перліту. Ближче до поверхні, в зоні, де міститься приблизно 0,5 % С, у структурі вже буде переважати перліт. Ця ділянка, що простягається до місця із вмістом вуглецю 0,8 %, називається доевтектоїдною зоною, а зона із вмістом вуглецю

0,8 %, яка має перлітну структуру, — евтектоїдною. Поверхнева зона із вмістом вуглецю понад 0,8 % буде складатися з перліту та вторинного цементиту, який часто виділяється у вигляді сітки. Вона називається заевтектоїдною.

На глибину цементації сталі впливає її хімічний склад. Ступінь впливу легуючих елементів на глибину дифузійного шару ілюструє рис. 3.11. Карбідотвірні елементи, такі як манган, хром, вольфрам, майже не впливають на глибину цементації сталі, а наявність нікелю, кремнію в ній приводить до зменшення глибини дифузійного шару.

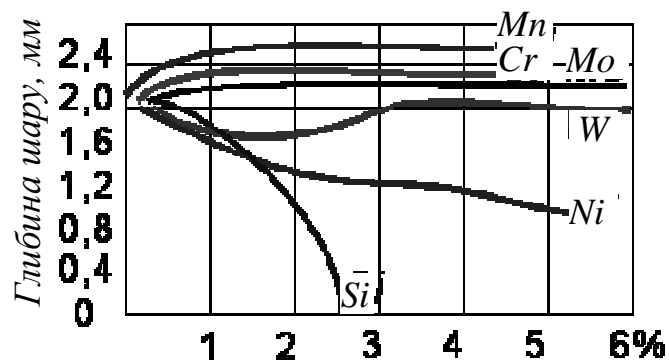


Рис. 3.11. Вплив легуючих елементів на глибину дифузійного шару

Вміст вуглецю в поверхневому шарі при заданій температурі цементації сталі визначає межа його розчинності в аустеніті (рис. 3.2, лінія *SE* діаграми стану залізо-вуглець).

Вищим температурам цементації сталі відповідає більша насиченість вуглецем цементованого шару. Практично встановлено, що найкращі експлуатаційні якості мають деталі з насиченням їхньої поверхні вуглецем до 0,9...1,2 %.

Подальше підвищення вмісту вуглецю в поверхневих шарах деталей призводить до того, що в їхній структурі утворюється сітка вторинного цементиту, яка спричинює крихкість цементованої сталі. Якщо ж вторинний цементит виділяється у вигляді



включень шарової форми або розірваної сітки, то крихкість сталі не настає.

Іноді при неправильному проведенні процесу цементації сталі можливими є випадки випалювання вуглецю та утворення тонких смужок з феритно-перлітною та феритною структурами.

Сталь із такими небажаними структурами називають аномальною. Ці структури утворюються при цементації недостатньо розкисненої сталі. Деталі, виготовлені з такої сталі, після термообробки мають недостатню поверхневу твердість («м'які» плями). Для аномальної сталі цементація не дає позитивних результатів.

Як правило, твердість сталі після цементації та гартування сягає 61...63 HRC, що пояснюється утворенням мартенситу.

Цементацію сталі здійснюють при температурі вище точки  $A_{c3}$ , оскільки в  $\alpha$ -залізі вуглець майже не розчиняється. Як правило, температура цементації сталі становить 900...950 °С. Її підвищення до 970 °С і більше приводить до збільшення глибини цементованого шару (рис. 3.12).

Тривалість витримки в основному залежить від заданої глибини дифузійного шару та виду карбюризатора і може коливатись в широких межах — від 2 до 20 год.

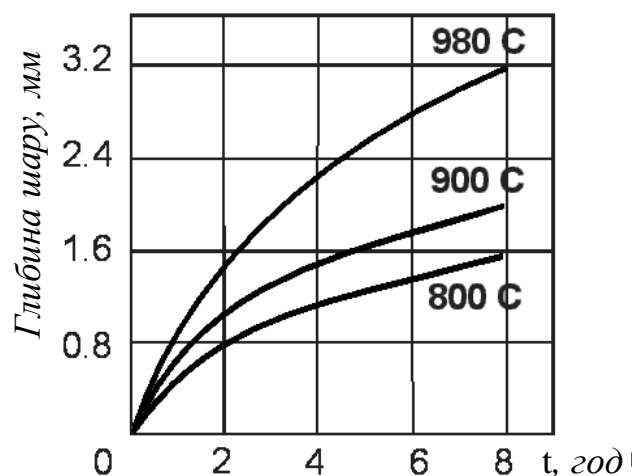


Рис. 3.12. Тривалість витримки від заданої глибини дифузійного шару

Для цементації сталі у твердому карбюризаторі використовують суміші деревного вугілля у вигляді зерен діаметром 3...7 мм з вуглекислими солями кальцію, барію або натрію та іншими домішками.

При цементації наступної партії деталей карбюризатор готують з 50...80 % відпрацьованого, заздалегідь просіяного карбюризатора, і 50...20 % свіжого. Суміші свіжого та відпрацьованого карбюризаторів потрібно ретельно перемішати.

Склад деяких твердих карбюризаторів наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Склад твердих карбюризаторів

№ суміші	Компоненти	Масова частка, %
1	2	3
1	Вуглекислий барій	20...25
	Вуглекислий кальцій	3.5...5
	Леткі речовини	<10
	Вода	<0,5
	Деревне вугілля	55...75
2	Вуглекислий барій	12...15
	Вуглекислий кальцій	3,5
	Вода	<6
	Напівкокс	75...85
3	Вуглекислий барій	12...15
	Вуглекислий натрій	1...1.5
	Вуглекислий кальцій	3...5
	Мазут (патока)	4...5
	Деревне вугілля	73,5...80
4	Вуглекислий натрій	10
	Вуглекислий кальцій	3
	Деревне вугілля	87
5	Вуглекислий натрій	10
	Деревне вугілля	90

Продовження таблиці 3.4

1	2	3
6	Вуглекислий барій	10
	Деревне вугілля	90
7	Ацетат натрію	10
	Напівкокс	30...35
	Деревне вугілля	55...60
	Мазут	2...3
8	Деревне вугілля	40
	Кісткове борошно	60

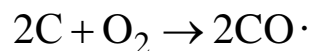
Для здійснення цементації сталі у твердому карбюризаторі застосовують спеціальні ящики, які виготовляють із жаростійкого (окалиностійкого) хромистого чавуну. Щоб підвищити довговічність ящиків, їх іноді виконують із жаростійкої листової сталі завтовшки 4...8 мм.

Технологічний процес твердої цементації складається з таких стадій:

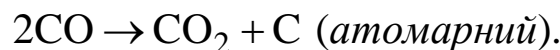
- очищення деталей від іржі, мастила та забруднень;
- сушіння підготовлених до цементації деталей;
- приготування карбюризатора;
- засипання шару карбюризатора товщиною 2...3 см на дно;
- укладання в ящик деталей пошарово з проміжними шарами карбюризатора;
- заповнення ящика так, щоб останній шар складався з карбюризатора;
- встановлення контрольних стрижнів із матеріалу, відповідного матеріалу сталі деталей;
- укладання кришки зверху ящика і герметизація її обмазкою з вогнетривкої глини (шамотної);
- сушіння обмазки та завантаження підготовлених ящиків у нагрівальну піч;

- повільне нагрівання ящиків до робочої температури, на 30...50 °С вищої від критичної точки  $A_3$  (900...950 °С), із необхідною тривалістю витримки і контролем шару цементації за допомогою стрижнів;
- повільне охолодження деталей разом з ящиком або на повітрі;
- термообробка (гартування деталей та низький відпуск).

У цементаційному ящику під час нагрівання через недостатність повітря вуглець карбюризатора з'єднується з киснем, утворюючи оксид карбону (II):

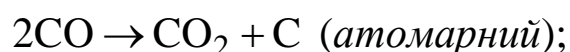
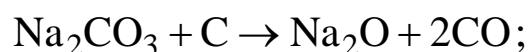
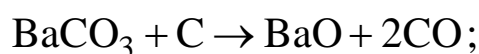


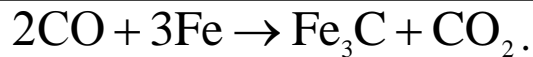
Оксид карбону CO(II), вступаючи у взаємодію з поверхнею деталі утворює оксид карбону CO<sub>2</sub>(IV) й атомарний вуглець:



Атомарний вуглець дуже активний. Він поглинається поверхнею деталі, розчиняється в аустеніті і дифундує в глибину деталі. При надлишку атомарного вуглецю, коли він не встигає адсорбуватися поверхнею та дифундувати вглиб деталі, утворюється молекулярний вуглець, який у вигляді сажі осідає на поверхні деталі.

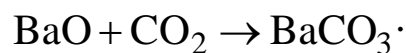
Головним джерелом вуглецю під час цементації сталі твердим карбюризатором є деревне вугілля, а карбонат барію (BaCO<sub>3</sub>) та карбонат натрію (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) активують процес цементації. Прискорення цементації відбувається завдяки додатковому утворенню на вуглецьованого газу — оксиду карбону (II) при дисоціації вуглекислих солей за реакціями:



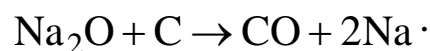


Насичення деталі може відбуватися також завдяки вуглецю вугілля. Проте цей процес можливий лише в місцях щільного контакту металу з твердими частками, що містять вуглець, і тому особливої ролі не відіграє.

Під час цементації сталі відбувається постійне поновлення карбонату барію за реакцією:



Отже, карбонат барію — невичерпний активізатор процесу. В той же час карбонат натрію активізує процес лише на його початковій стадії. Діоксид натрію, що утворився при розпаді  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , вступає в реакцію з вуглецем, продуктами якої є оксид карбону і парів натрію:



Карбюризатори можуть мати замість  $\text{BaCO}_3$  та  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  інші активізатори, наприклад 5...8 % ацетату натрію ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) й ацетат барію ( $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ). Ці солі мають дуже високу активуючу здатність, тому що при дисоціації їх поряд з оксидом карбону  $\text{CO}(\text{II})$  утворюється метан  $\text{CH}_4$ , який додатково сприяє утворенню атомарного вуглецю. Використання ацетатів під час цементації сталі дає змогу частково замінити дефіцитне деревне вугілля кам'яновугільним коксом, що має вищу теплопровідність і дає меншу усадку. Щоб не допустити спікання частинок карбюризатора при тривалій витримці під час цементації сталі, в нього додають вапняк ( $\text{CaCO}_3$ ).

На процес науглецювання сталі впливає конструкція цементацийних ящиків, тому вони мають забезпечити певні вимоги: за формою наближатися до форми деталі з умовою швидкого їх нагрівання з ефективним використанням потужності нагрівальної

печі. Необхідно, щоб об'єм ящика, який займають деталі, становив 20...30 % його повного об'єму, а укладання деталей здійснювалося б згідно з виробничою інструкцією.

Тривалість витримки деталей при температурі цементації визначають залежно від заданої глибини дифузійного шару, розмірів ящика і температури процесу. Для цього найчастіше використовують узагальнені дані виробничої практики, оформлені у вигляді номограм, таблиць тощо. В таблиці 3.5 наведено загальну тривалість цементації сталі твердим карбюризатором при температурі 910...930 °С.

*Таблиця 3.5. Тривалість цементації сталі твердим карбюризатором*

Мінімальний розмір ящика, мм	Глибина дифузійного шару, мм			
	0,5...0,7	0,7...0,9	0,9...1,2	1,2...1,5
100	4...5	5...6	6...7,5	7,5...9
150	4,5...5,5	5,5...6,5	6,5...8,5	9...11
200	5,5...6,5	6,5...7,5	7,5...9,5	10...12
250	6,5...7,5	7,5...8,5	8,5...10,5	11...14

Для запобігання перенасиченню поверхні вуглецем процес цементації сталі рекомендується вести в два цикли: починати при температурі 950 °С і завершувати при температурі 850 °С. Щодо тривалості циклів, то 1/3 частину процесу цементації займає перший цикл, а решту — другий.

Контроль процесу цементації сталі виконують за допомогою стрижнів, які закладають в цементацийний ящик. Вони дають змогу визначити товщину шару цементації як під час протікання процесу, так і в кінці його. Для контролю виймається з ящика стрижень, що знаходився всередині між деталями. Товщину ди-

фузійного шару визначають на зломі стрижня після його гартування. При цьому можна встановити також мікроструктуру шару. Металографічний аналіз дає можливість з'ясувати концентрацію вуглецю та наявність дефектів. У масовому виробництві в якості стрижнів використовують браковані деталі.

Якщо режим цементації деталей ще точно не встановлений, що трапляється в одиничному та малосерійному виробництвах, то контроль виконують у ході процесу, використовуючи зовнішній стрижень, який виймають з ящика за 1 годину до закінчення процесу. Після визначення глибини шару цементації процес обробки деталей коригується. Розкладання ящиків після цементації здійснюється при температурі, не вищій за 100 °С. Холодні деталі повинні мати світло-сіру поверхню.

Цементация сталі в твердому карбюризаторі має певні недоліки: неможливість під час обробки керувати процесом насичення поверхні вуглецем, великі витрати теплоти, низька продуктивність праці, неможливість безпосереднього гартування сталі після цементації тощо. Процес супроводжується значним утворенням вугільного пилу, кіптяви та бруду. Проте завдяки універсальності і простоті цементация застосовується переважно на заводах середньосерійного й одиничного виробництв, а також для обробки масивних деталей.

З метою підвищення продуктивності цементації та коефіцієнта корисної дії печі використовують карбюризатори у вигляді паст, складові яких наведено в таблиці 3.6.

Паста складаються з речовин, які містять вуглець. Це голландська (ацетиленова) сажа або деревинновугільний пил; прискорювачі процесу — вуглекислий натрій, вуглекислий барій, залізоціаністий калій, щавелєвий натрій; зв'язувальні речовини — декстрин, мазут та інші розріджувачі. Для виготовлення паст вихідні компоненти у вигляді порошку просівають і завантажують у

мішалку в відповідному відношенні, додаючи рідкі складові та безперервно перемішуючи суміш. Процес завершують, коли маса пасти набуває однорідної сметаноподібної консистенції.

**Таблиця 3.6. Масові частки компонентів паст карбюратора**

Номер суміші	Компонент	Масова частка, %	Номер суміші	Компонент	Масова частка, %	
1	Газова сажа	28	4	Деревинновугільний пил	75	
	Кальцинована сода	3,5			Кальцинована сода	5
	Залізоціаністий калій	1,5			Залізоціаністий калій	10
	Веретенне мастило (відпр.)	67			Декстрин	10
2	Голландська сажа	30	5	Ацетиленова сажа	60	
	Кальцинована сода	10			Кальцинована сода	20
	Декстрин	20			Залізоціаністий калій	10
	Машинне мастило (відпр.)	40			Декстрин	10
3	Ацетиленова сажа	30	6	Голландська сажа	70	
	Кальцинована сода	20			Кальцинована сода	10
	Декстрин	10			Залізоціаністий калій	10
	Мазут	40			Декстрин	10

Технологія цементації сталевих виробів пастами включає операції покриття їхньої поверхні пастою потрібної консистенції. Товщина шару пасти визначається необхідною глибиною дифузійної зони. У всякому разі вона має у шість разів перевищувати глибину цементації. Далі деталі, що підлягають цементації, завантажують у цементацийний ящик, який поміщають у піч. Процес



відбувається при температурі 880...950 °С. Після охолодження ящиків на повітрі деталі піддають гартуванню та низькому відпуску. Тривалість витримки при цементації сталі пастами скорочується в 2...4 рази. Для цементації сталі в рідкому карбюризаторі використовують розплави солей (наприклад, суміші NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KCl, BaCl<sub>2</sub>, SiCl), в які при температурі 930...950 °С занурюють деталі, що підлягають цементації. Насичення сталі вуглецем у розплавленій суміші солей відбувається завдяки атомарному вуглецю, що утворюється при дисоціації ціанистих і вуглекислих солей. При рівномірному нагріванні у ванні деталі швидко (за 0,3...2,5 год) науглецьовуються на глибину 0,3...0,7 мм. На деталях відсутні окалина та деформація. Гартування деталей можна виконувати безпосередньо в ваннах, не охолоджуючи їх на повітрі. Цементация в рідкому карбюризаторі ефективна для зміцнення інструментів із сталі і деталей малих розмірів.

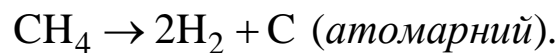
Більшого поширення на заводах із багатосерійним та масовим виробництвом набуває газова цементация. Процес відзначається простотою виконання, високою продуктивністю, можливістю механізації й автоматизації операцій і порівняно з твердою цементацией є більш сучасним та економічним. Газова цементация допускає регулювання глибини дифузійного шару і концентрацію вуглецю в ньому, що дає можливість стабільно випускати високоякісну та надійну продукцію. Енергоємність обробки при газовій цементации значно нижча, тому що не витрачається енергія на прогрівання ящиків і великої маси твердого карбюризатора. Значно поліпшуються умови праці працюючих.

Процес цементации з застосуванням газового карбюризатора здійснюють нагріванням деталей в середовищі газів-карбюризаторів у спеціальних герметичних печах при температурі 900...950 °С з наступною термообробкою деталей. Карбюризатор — суміш природного газу метану та газу-розріджувача (ендо-

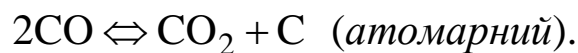
газ), Для отримання заданої концентрації вуглецю в цементованому шарі (як правило, це 0,8 %) найчастіше застосовують ендотермічну контрольовану атмосферу, що складається з 92...95 % ендогазу та 8...5 % природного газу.

На деяких підприємствах цементацію сталі проводять в атмосфері нерозбавленого природного газу, пропану, оксиду вуглецю, а також світильного і генераторного газів, отриманих крекінгом нафти. Вживають також рідкі карбюризатори: гас, бензин, синтин (рідке синтетичне паливо) тощо. Рідкі карбюризатори подають краплями в герметичний робочий простір печі, де утворюється газова фаза.

При температурі, метан розпадається



Оксид карбону (II) дисоціює



У процесі утворення атомарного вуглецю іноді утворюється смола, з якої може виділятися кокс. Смола ускладнює доступ атомарного вуглецю до поверхонь, що цементуються, і це погіршує умови цементації сталі.

Склад газового карбюризатора визначає атмосферу в печі: навуглецьовувальну, зневуглецьовувальну чи нейтральну. Цементация ведеться комбіновано: спочатку середовище має бути з ендотермічного газу та природного, а потім з ендогазу. Температура цементації сталі, як правило, становить 910...930 °С, а для прискорення процесу її підвищують до 1000...1050 °С. У разі газової цементації тривалість обробки скорочується в 2...2,5 рази порівняно з цементацією сталі твердим карбюризатором.

Середні швидкості газової цементації сталі залежно від температури наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7. Середні швидкості газової цементації сталі, мм/год

Глибина цементації, мм	Температура, °С				
	900	925	950	975	1000
<0,5	0,45	0,55	0,75	-	-
0,5...1,0	0,30	0,40	0,55	0,75	0,95
1,0...1,5	0,20	0,30	0,40	0,55	0,75
1,5...2,0	0,15	0,20	0,25	0,35	0,55
2,0...2,5	0,12	0,15	0,20	0,25	0,40

Витрати карбюраторів на 1 м<sup>2</sup> поверхні, що цементується, в середньому становлять 0,35...0,4 м<sup>3</sup>/год для газоподібного, та 0,1...0,12 л/год для рідкого.

Останнім часом усе ширше застосовується процес вакуумної цементації сталі. Вакуумна піч складається з нагрівальної камери з вентилятором для забезпечення інтенсивної циркуляції насичувальної атмосфери, транспортних пристроїв і гартівного бака. Температуру при вакуумній цементації сталі можна підняти до 1100 °С, суттєво скоротивши тривалість обробки. Виконати це в прохідних печах при звичайній газовій цементації сталі малоефективно в основному через різке скорочення терміну служби оснащення печі.

Процес цементації сталі здійснюється в два етапи. На першому, активному етапі насичення, в піч подають природний газ — метан під тиском 13...40 кПа. Вміст вуглецю на поверхні деталі досягає 2 %. На другому етапі подачу газу припиняють, у печі створюють вакуум і деталі піддають витримці. Під час витримки відбувається дифузія вуглецю вглиб деталі, і на його поверхні концентрація вуглецю стає оптимальною (0,8...1 %). Після закінчення витримки піч охолоджують до температури 500...600 °С (нижче температури гартування), а потім знову нагрівають до температури гартування. Такий режим охолодження-нагрівання

сприяє подрібненню зерен, які виростили при високій температурі цементації сталі, та її перекристалізації.

Гартування виконують зануренням піддону із деталями в мастильну гартівну ванну. Відпуск деталей виконують при температурі 180 °С.

Вакуумна цементація сталі вигідно відрізняється від інших способів обробки: тривалість цементації становить приблизно 1,5 год, тобто майже в 10 разів менша, ніж при звичайній цементації; нема потреби в установках для приготування насичувальних газів; відсутність кисню і вологи виключає окиснення деталей, їхня поверхня залишається чистою. Крім того, зменшуються питомі витрати електричної енергії та забезпечується вища культура виробництва.

Режим термообробки деталей після цементації, що проводиться для отримання необхідних властивостей, залежить від багатьох факторів: способу цементації сталі, марки, структури дифузійного шару тощо.

Найпоширеніші режими термообробки деталей після цементації графічно зображено на рис. 3.13.

Якщо сталь спадково дрібнозерниста, а деталі, виготовлені з такої сталі, не мають відповідального призначення, то застосовують найпростіший режим: безпосереднє гартування від температури цементації з охолодженням у мастилі чи розплаві солі (160...180 °С).

Кращі результати дає гартування сталі після попереднього охолодження на повітрі до 800...850 °С (температури вище критичної точки  $A_{c3}$  серцевини сталі), яке зменшує короблення деталей (рис. 3.13, *a*). Воно забезпечує утворення мартенситу в цементованому шарі та часткову перекристалізацію серцевини з подрібненням зерна.

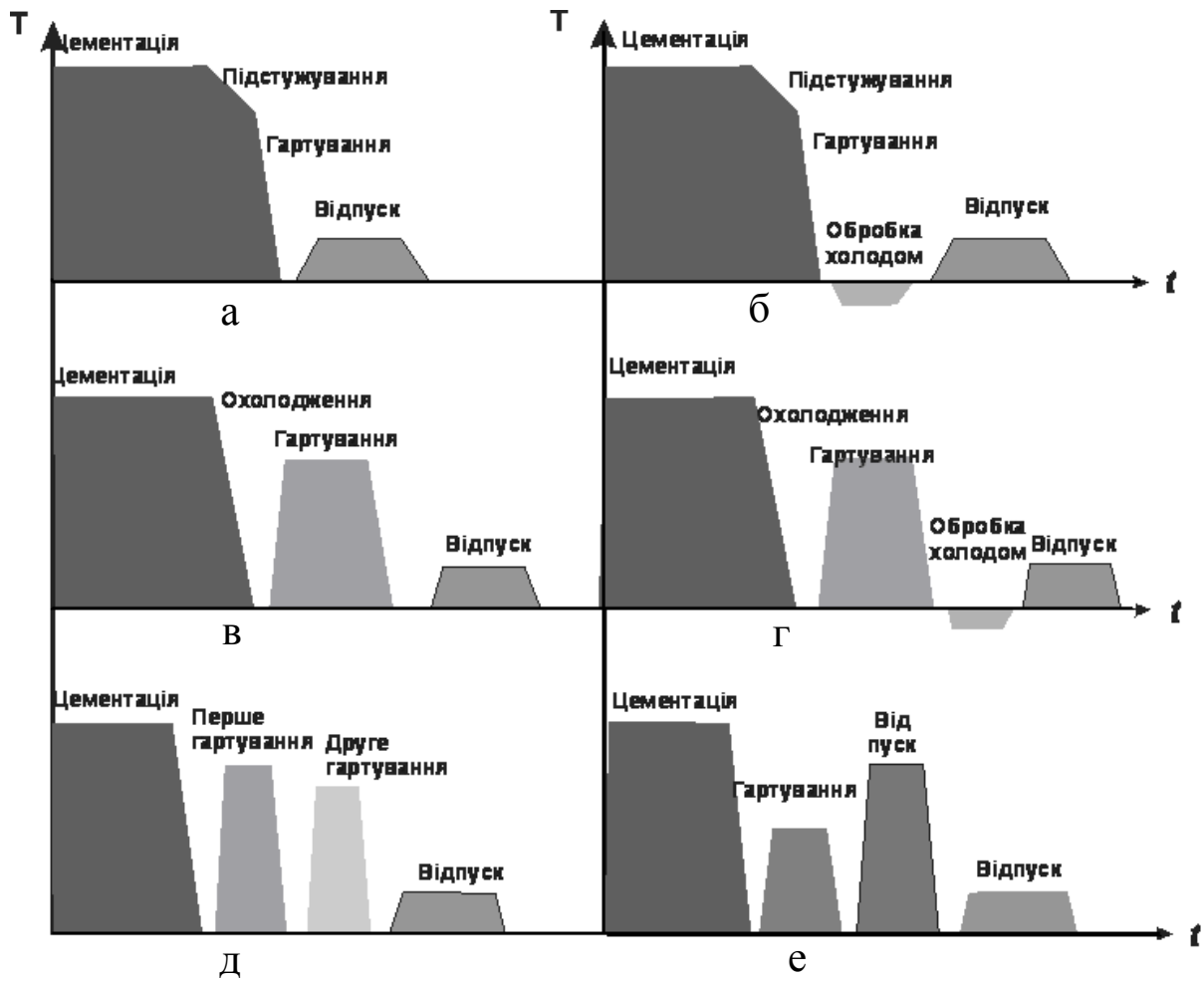


Рис. 3.13. Режими термообробки деталей після цементациї

Для перетворення залишкового аустеніту, який буває в цементованому шарі легованих сталей і знижує поверхневу твердість деталей, після гартування сталі додатково призначають обробку її холодом (рис. 3.13, б).

Після цементациї сталі твердим карбюризатором та газової цементациї в шахтних печах застосовують швидке або повільне охолодження деталей. При швидкому охолодженні не утворюється карбідна сітка, але збільшується короблення деталей. Наступне гартування деталей виконують, починаючи з температури нагрівання 760...780 °C або з температури вище критичної точки  $A_{c3}$  для повного гартування серцевини деталей (рис. 3.13, в).

Для зменшення короблення деталей іноді використовують ступінчасте гартування (160...180 °С). За наявності в дифузійному шарі залишкового аустеніту призначають обробку сталі холодом (рис. 3.13, *з*).

Для відповідальних деталей машин з метою забезпечення їхніх високих механічних властивостей після цементації в твердому карбюризаторі застосовують складніший режим термообробки (рис. 3.13, *д*). Як правило, деталі після цементації охолоджуються на повітрі або разом з ящиком, внаслідок чого в структурі дифузійного шару утворюється небажана карбідна сітка. Тому для отримання необхідної структури деталей призначається подвійне гартування. Перше гартування (або нормалізація), починаючи з температури 880...900 °С, усуває карбідну сітку і подрібнює зерно серцевини деталей. Нормалізація дає значно менше короблення, але не завжди усуває карбідну сітку в шарі. При другому гартуванні, починаючи з температури 760...830 °С, подрібнюється зерно цементованого шару, внаслідок чого зменшується його крихкість і досягається висока твердість сталі.

У дифузійному шарі деталей відповідального призначення, виготовлених з високолегованих сталей (20Х2Н4А, 18Х2Н4ВА та ін.), навіть при сповільненому охолодженні після цементації залишається велика кількість неперетвореного аустеніту. З метою його розкладу й утворення легованих карбідів, які підвищують твердість шару, після цементації сталі спочатку призначають високий відпуск деталей при температурі 600...640 °С з тривалістю витримки 3...10 год (рис. 3.13, *е*). Температура нагрівання для гартування сталі 20Х2Н4А становить 780...800 °С, а сталі 18Х2Н4ВА — 800...820 °С. При гартуванні сталі аустеніт перетворюється на дрібноголчатий мартенсит, кількість залишкового аустеніту різко спадає, твердість дифузійного шару зростає.

Заключною операцією термообробки деталей після цементації є низький відпуск при температурі 160...180 °С, внаслідок чого в поверхневому шарі утворюється структура відпущеного мартенситу, частково знімаються внутрішні напруження в сталі. Твердість її поверхневих шарів становить 60...63 HRC, а серцевини — 25...30 HRC.

Іноді за умовами технологічного процесу виготовлення деталей деякі їхні поверхні не повинні цементуватися. Тоді їх захищають від дії карбюризатора різними покриттями: спеціальними обмазками, мідненням та ін.

Кращим засобом захисту поверхні від насичення вуглецем при цементації сталі в твердому карбюризаторі є гальванічне покриття міддю. Для надійного захисту товщина шару міді має бути в межах 0,02...0,07 мм. Після цементації захисний шар міді видаляють електрохімічним способом. Однак застосування міднення потребує додаткового обладнання та витрат праці кваліфікованих працівників, що впливає на економічні показники процесу.

Дуже простим і доступним методом захисту сталевих виробів від впливу карбюризатора є ізоляція поверхні замазками. Спеціальні ізоляційні замазки наносять на поверхню деталі м'якою щіткою, зануренням чи пульверизатором товщиною не більш як 2...3 мм (таблиця. 3.8).

При нагріванні деталей під час цементації на місці замазки утворюється плівка, що захищає поверхню деталі від активного вуглецю карбюризатора.

У дрібносерійному виробництві використовують простіші засоби захисту від навуглецьовування: азбест, змочений у воді; суміш вогнетривкої глини з крихтами азбесту та ін. Крім того, при виготовленні деталі на захисних поверхнях залишають припуск матеріалу відповідної товщини, який після цементації перед гартуванням знімають обробкою різанням.

Таблиця 3.8. Склад і рекомендації для спеціальних ізоляційних замазок

Компонент	Масова частка,	Рекомендації для виготовлення
Тальк	50	Усі компоненти змішують з рідким склом до утворення сметаноподібної консистенції
Біла глина	25	
Вода	25	
Пісок	40	Усі компоненти перемішують і розводять рідким склом до утворення сметаноподібної консистенції
Глина	44	
Бура	10	
Натрієва селітра	3	
Оксид свинцю	3	
Тальк	58	Компоненти розводять рідким склом (одна частина компонента і три частини рідкого скла)
Оксид алюмінію	28	
Свинцевий сурик	14	
Глина шамотна	90	Компоненти розводять водою до утворення сметаноподібної консистенції. Застосовувати для захисту отворів
Азбестова крихта	10	
Однохлориста мідь	70	Компоненти розводять каніфольним лаком до утворення сметаноподібної консистенції
Свинцевий сурик	30	
Глина	50	—
Рідке скло	50	

Застосування міднення та вищезазначених замазок при газовій цементації сталі виявляється неефективним, оскільки крізь захисний шар проникає активний вуглець.

Для захисту поверхні виробів при газовій цементації використовують пасту такого складу: оксид бору — 35 %, карбід кре-



мнію — 15 %, епоксидна смола— 1 %, каніфоль — решта. Суміш розводять толуолом у співвідношенні 1:1.

Після гартування сталі паста повністю залишається на деталях, не забруднюючи гартівне мастило. Паста досить дешева і задовольняє екологічним вимогам до виробництва.

### 3.4.3. Азотування

Азотування — це процес дифузійного насичення поверхні виробів із сталі і чавуна азотом при нагріванні в середовищі, в якому утворюється атомарний азот. Після азотування сталь та чавун набувають:

- високої твердості на поверхні, яка не змінюється при нагріванні до температури 500...600 °С;
- високої межі витривалості;
- високої кавітаційної стійкості;
- значної корозійної стійкості на повітрі, у прісній воді та водяній парі.

Азотований шар добре шліфується і полірується. Азотують вуглецеві сталі та леговані алюмінієм, хромом, молібденом, ванадієм й іншими елементами, а також чавуни, з яких виготовляють гільзи і циліндри двигунів внутрішнього згоряння, зубчасті колеса, колінчасті вали, деталі гідравлічних насосів та турбін, парових установок тощо.

Розрізняють газове азотування та азотування в рідкому середовищі.

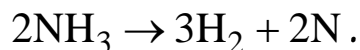
Процес газового азотування здійснюють у частково дисоційованому аміаку  $\text{NH}_3$ , в суміші аміаку й азоту, суміші аміаку та попередньо дисоційованого аміаку. Для активізації процесу в аміаководневу суміш вводять кисень або повітря. Широке засто-

сування знаходять атмосфери на основі частково дисоційованого аміаку і компонентів, що містять вуглець: природного чи світільного газу, ендогазу, екзогазу, продуктів піролізу вуглеводнів, синтину, гасу, спирту тощо. Для азотування деталі завантажують у герметичні печі, в які подають насичувальну суміш газів з аміаком.

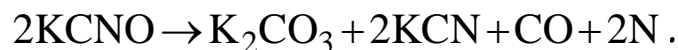
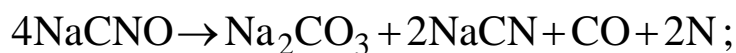
Як рідкі середовища для азотування використовують розплави ціаністих солей лужних металів (KCN, NaCN, Ca(CN)<sub>2</sub> та ін.) з домішками карбонатів (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) в різних пропорціях, а також розплави на основі карбаміду CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> з такими самими домішками.

Залежно від температури процесу насичення розрізняють низькотемпературне (500...600 °C) та високотемпературне (600...1200 °C) азотування сталі і чавуну.

При газовому азотуванні відбувається дисоціація аміаку з утворенням азоту за реакцією



Дисоціація солей в розплавах



Утворений активний азот насичує поверхню і дифундує вглиб деталі.

Довгий час вважалось, що висока активність аміаку під час азотування визначається утворенням атомарним азотом при його дисоціації. На сьогодні доведено, що дисоціація аміаку є іонним процесом, який супроводжується утворенням негативно заряджених іонів азоту. Тому застосування при азотуванні електростати-

чних полів, іскрового або жевріючого розрядів значно прискорює цей процес і має широкі перспективи у практичному використанні.

При низькотемпературному азотуванні незалежно від того, в якому середовищі відбувається обробка, сталь переважно насичується азотом, й у дифузійному шарі утворюються азотисті фази:  $\alpha$ -фаза— азотистий ферит (вміст азоту при 20 °С близько 0,015 %, при 591 °С — 0,11 %);  $\gamma$ -фаза — твердий розчин азоту в  $\gamma$ -залізі (існує вище температури евтектоїдного перетворення 591 °С, максимальна розчинність азоту 2,8 %, при швидкому охолодженні зазнає мартенситного перетворення);  $\gamma'$ -фаза — твердий розчин азоту на основі нітриду  $\text{Fe}_4\text{N}$  (5,6...5,95 %  $\text{N}_2$ );  $\varepsilon$ -фаза — твердий розчин азоту на основі нітриду заліза  $\text{FeN}_3$  (8...11 %  $\text{N}_2$ ). Присутність у сумішах вуглецю приводить до утворення на поверхні карбонітридних фаз на зразок  $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$ .

Утворені азотуванням зони, що складаються з поверхневих фаз, поверхневої нітридної зони і дифузійного підшару (зони внутрішнього азотування), забезпечують широкий діапазон фізико-механічних властивостей азотованих виробів. Середня швидкість азотування сталі залежить від температури та глибини шару (таблиця 3.9).

Таблиця 3.9. Середня швидкість азотування сталі

Глибина шару, мм	Швидкість азотування (мм/год) при температурі, °С		
	500	550	600
<0,2	0,020	0,040	-
0,2...0,4	0,015	0,030	0,06
0,4...0,6	0,010	0,020	0,03
0,6...0,8	-	0,015	0,02

Низькотемпературне азотування виробів застосовують як зміцнювальний засіб. Проте фази, які утворюються в азотованому шарі вуглецевих сталей, не забезпечують отримання досить високої твердості, а дифузійний шар крихкий. Тому азотуванню піддають вироби, виготовлені з легуваних сталей. Нітриди і карбонітриди легуючих елементів (типу  $MN_4$ ,  $M_2N$  ( $Fe\ M$ ) $_4$   $N$ ,  $Fe_2 \cdot 3(N\ C)$ ,  $(Fe\ M)_2 \cdot 3(M\ C)$  та ін.) дуже дисперсні, мають високу твердість та термічну стійкість. Для зміцнювального азотування часто використовують спеціальні сталі (нітралої), до складу яких входять елементи, що утворюють термічно стійкі нітриди ( $CrN$ ,  $AlN$ ), наприклад сталь 38ХМЮА. Азотування майже не змінює якість поверхні, форму і розміри виробів, а також властивості матеріалу. Тому в загальному вигляді технологічний процес виготовлення азотованих виробів з конструкційних сталей може бути побудований в такій послідовності:

- попередня термообробка (гартування і відпуск), для отримання необхідних механічних властивостей сталі;
- механічна обробка виробів, включаючи шліфування;
- захист місць, які не підлягають азотуванню;
- власне процес азотування;
- кінцеве шліфування або доведення до відповідності заданим допускам.

Для захисту окремих поверхонь виробу від азотування застосовують покриття. Гальванічні монометалеві (лудіння, нікелювання, цинкування) і біметалеві (свинець—цинк, мідь—свинець, нікель—свинець) покриття наносять товщиною 0,01...0,06 мм, а спеціальні замазки — товщиною 1...2 мм.

Перед азотуванням вироби знежирюють, з поверхні корозійностійких сталей видаляють оксидну плівку, використовуючи декапірування, травлення тощо.

Азотування виробів здійснюють при температурі 500...520 °С протягом 24...90 год. Вміст азоту в поверхневому шарі досягає 10...12 %, глибина насичення — 0,3...0,6 мм, твердість — 1000...1200 НV. За вищих температур азотування прискорюється, але твердість шару знижується. Тому іноді азотування здійснюють спочатку при знижених температурах, а потім температуру підвищують до 560...600 °С. Такі тонкі шари мають більшу твердість порівняно з грубими шарами тривалого азотування при тих же температурах. Рекомендовані режими зміцнювального азотування деяких марок сталі наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10. Рекомендовані режими зміцнювального азотування

Марка сталі	Температура азотування, °С	Витримка, год	Глибина шару, мм	Твердість азотованого шару, НV
1	2	3	4	5
38X2MЮА	500...520	48...60	0,4...0,5	1000...1100
	520, (1 ступеня)	15	0,5...0,6	850...1000
	550, (2 ступеня)	25	0,5...0,6	850 1000
18X2H4MA	490...510	40..50	0,35...0,40	750...850
40XH2MA	510, (1 ступеня)	25	0,5...0,6	600
	540, (2 ступеня)	35		
30X3MФ	560	24	0,5	900...950
30XH2MФА	510, (1 ступеня)	25	0,5...0,6	750
	540, (2 ступеня)	35		
40XH2MA 38X2H2MA 38XH3MФА	500...520	50...60	0,5...0,6	640...700
40X2H2MA	510, (1 ступеня)	25	0,6...0,7	≥640
30XH2MФА	540, (2 ступеня)	30		≥700
38XH3MФА		30		≥700
30X3MФ	500...525	60...80	0,35...0,55	750...800

Продовження таблиці 3.10

1	2	3	4	5
P18	560...580	0,12...0,4	0,03...0,06	1250...1400
P6M3		0,5...1	0,065...0,095	1350...1400
3X2B8Ф	560	2...3	0,105...0,140	1185...1260
4X4BMФC	580...600	1...2	0,10...0,15	1150...1310
X12M	560	1...2	0,080...0,095	1075...1110
10X13	500	48	0,14...0,16	1000...1050
	550		0,25...0,30	900...950
	600		0,35...0,40	800 850
15X11MФ	530, (1 ступеня)	10	0,35...0,40	900...950
	560, (2 ступеня)	20		

Азотування для підвищення корозійної стійкості сталевих виробів здійснюють при температурі 650...700 °С. 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 антикорозійного азотування виробів придатні будь які сталі, навіть прості вуглецеві (таблиця 3.11)

Таблиця 3.11. Рекомендовані режими антикорозійного азотування

Марка сталі	Температура процесу, °С	Тривалість процесу, год	Ступінь дисоціації аміаку, %
Ст 1...Ст 5	600	60...120	35...40
A12...A20	700	15...30	55...58
40X, У7...У10	770 850	5...10	80
ШХ15	600...700	15...45	54 75

Антикорозійне азотування застосовують для обробки кріпильних деталей (болтів, гайок) та інших виробів.

#### 3.4.4. Ціанування і нітроцементация

Ціануванням і нітроцементациєю сталі називають одночасне насичення поверхневих шарів деталей вуглецем та азотом. Такі дифузійні шари мають високі твердість й опірність спрацюванню, підвищену міцність від утомленості та корозійну стійкість. Спільна дифузія вуглецю й азоту відбувається значно швидше, ніж кожного з них окремо; тому тривалість процесу скорочується (до 0,5...2 год). Крім того, процес ціанування супроводжується значно меншими деформаціями деталей складної форми. Ціануванню піддають деталі, виготовлені з конструкційних вуглецевих і легированих сталей, а також інструменти, виконані зі швидкорізальних сталей.

Ціанування здійснюють у рідкому або твердому насичувальному середовищі. Залежно від температури нагрівання деталей при обробці розрізняють низькотемпературне (540...560 °С), середньотемпературне (820...860 °С) та високотемпературне (920...960 °С) ціанування. За підвищених температур поверхня деталей насичується більше вуглецем, ніж азотом, тобто процес швидше наближається до цементациї.

Низькотемпературне ціанування використовують для зміцнення загартованих та відпущених інструментів із швидкорізальних сталей на глибину 0,02...0,4 мм, а також прес-форм для лиття під тиском, штампового інструмента із сталей 3Х2В8, ХІ2М і деталей із середньовуглецевих сталей. Насичення відбувається у ванні з розплавленими солями: ціанистого калію (KCN), ціанистого натрію (NaCN), ціанистого калію-заліза ( $K_4Fe(CN)_6$ ) з домішками нейтральних солей (NaCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> тощо) протягом 0,5...3 год.

Для ціанування сталі у твердому середовищі застосовують суміші, що складаються з деревного вугілля, жовтої кров'яної со-

лі, карбонатів барію, натрію, калію, кісткового борошна та ін. Після обробки стійкість виробів зростає в 2...3 рази. Зміцнений шар складається з тонкого (10...15 мкм) поверхневого шару карбонітридів  $Fe_3(CN)$ , під яким є твердий шар (600...1000 HV) азотистого фериту товщиною 0,2...0,5 мм. За продуктивністю ціанування сталі у твердих сумішах значно поступаються рідкому або газовому ціануванню і не знайшло широкого використання.

Середньотемпературне ціанування застосовують для поверхневого зміцнення невеликих за розмірами деталей з низько- та середньовуглецевих, а також легованих сталей: зубчастих коліс малого модуля, пальців, втулок, гайок, шайб тощо. На таких деталях технічними умовами найчастіше передбачається зміцнений шар невеликої глибини (до 0,5 мм), тому тривалість насичення становить 0,5...1,5 год. Як насичувальне середовище використовують розплави солей, до складу яких також входять ціаніди. Після насичення дифузійний шар може містити 0,8...1,2 %  $N_2$  та 0,6...0,7 % C. Для забезпечення остаточних властивостей деталі гартують безпосередньо з ціаністої ванни, а потім відпускають при температурі 180...200 °C.

Високотемпературне ціанування застосовують для зміцнення деталей із вуглецевих і спеціальних сталей з вмістом вуглецю до 0,4 % на глибину 0,15...2 мм залежно від температури витримки. Як правило, її вибирають у межах 1,5...6 год, після чого на поверхні деталі вміст вуглецю досягає 0,8...1,2 %, азоту — 0,2...0,3 %.

Збільшення вмісту ціаністих солей в насичувальному розплаві сприяє підвищенню концентрації вуглецю та азоту в поверхневому шарі деталі, глибина якого залежить від температури і тривалості процесу. Відповідно змінюється також структура дифузійного шару. Висока температура процесу зумовлює зростання розміру зерна аустеніту, тому режим кінцевої термообробки



може бути досить складним, подібним до обробки цементованих деталей (див. § 4): нормалізація, гартування, низький відпуск; подвійне гартування, обробка холодом, низький відпуск та ін. Після такої термообробки твердість поверхневого шару перевищує 58 HRC, а твердість серцевини становить 180...400 HB.

Суттєвим недоліком ціанування сталі є отруйність ціанис-тих солей і висока вартість процесу. Тому найбільшого поширення набули процеси насичення сталі вуглецем й азотом у газовому середовищі, що містить аміак та навуглецьовувальний газ: ендогаз, екзогаз, природний газ, пари триетаноламіну, гасу, синтину та ін. Розрізняють високотемпературну (800...950 °С) і низькотемпературну (560...580 °С) нітроцементацию сталі. Глибина нітроцементации залежить від температури та тривалості процесу.

Високотемпературну нітроцементацию сталі виконують протягом 2...10 год на глибину шару 0,2...1 мм. Остаточних властивостей нітроцементовані сталеві деталі набувають після термообробки, подібної до обробки цементованих сталевих деталей (див. § 4). Після неї твердість поверхневого шару досягає 60...62 HRC.

Низькотемпературній нітроцементации піддають сталеві деталі, що вже пройшли термообробку на задані властивості. Як і при азотуванні, тривалість процесу лежить у межах 0,5...6 год. Нітроцементация підвищує поверхневу твердість сталевих деталей, стійкість до спрацювання та задирок, забезпечує достатню припрацьовуваність і високу зносостійкість деталей.

Іноді високотемпературну нітроцементацию сталі називають карбонітруванням, а низькотемпературну — нікотруванням. Порівняно з газовою цементацией нітроцементация забезпечує меншу деформацію та короблення сталевих деталей, підвищені корозійну стійкість і стійкість деталей до спрацювання.

### 3.5. Дифузійне насичення металевих сплавів металами та неметалами

Для багатьох деталей енергетичного машинобудування потрібна висока опірність окисній дії робочого та навколишнього середовища при високих температурах (окаліно- та жаростійкість). Залишається важливою проблемою захист виробів з вуглецевих та низьколегованих сталей від корозії на повітрі, у воді, водяній парі. Вирішити ці проблеми можна за допомогою дифузійної металізації.

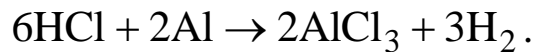
Дифузійна металізація — це процес хіміко-термічної обробки, під час якої відбувається насичення поверхні виробів із сталі та чавуну металами. Процес насичення їх алюмінієм називають алітуванням, хромом — хромуванням, бором — боруванням, кремнієм — силіціюванням тощо.

Дифузійну металізацію, як і інші процеси хіміко-термічної обробки виробів, можна здійснювати у твердих, рідких та газоподібних середовищах.

Металізаторами для твердої дифузійної металізації виробів є порошкоподібні суміші потрібного елемента або його сплаву з залізом — феросплави (FeAl, FeCl, FeSi та ін.), активатора (NH<sub>4</sub>Cl та ін.), а також нейтральної домішки (каолін, шамот) для запобігання спіканню суміші.

У процесі хіміко-термічної обробки виробу одночасно або послідовно проходять кілька хімічних реакцій, що мають різне значення для дифузійного насичення, як основні, так і небажані побічні перетворення. Так, в алітувальній суміші відбуваються такі реакції:

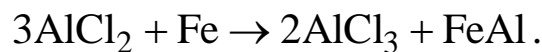
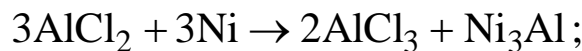
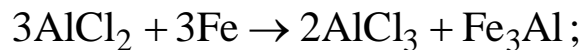




Більш легкі гази ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  та  $\text{HCl}$ ) частково видаляються з контейнера, де відбувається процес, а стійкіші та важкі пари хлорату алюмінію  $\text{AlCl}_3$  реагують з алюмінієм за реакціями:



Процес алітування проходить



Згідно з наведеними реакціями в ході процесу відбувається відновлення хлорату алюмінію  $\text{AlCl}_3$ , який знову вступає у зворотні реакції.

Рідку дифузійну металізацію здійснюють, занурюючи деталі в розплавлений метал (наприклад, алюміній).

Газову дифузійну металізацію виконують у середовищах, в яких може утворюватись газова насичувальна фаза (наприклад, при пропусканні хлору в середовищі, що містить феросиліцій  $\text{FeSi}$  чи карбід кремнію  $\text{SiC}$ ).

Оскільки метали на відміну від вуглецю та азоту утворюють із залізом розчини заміщення, дифузія їх проходить значно повільніше. Тому дифузійні металізаційні шари у десятки й сотні разів тонші за однакових температурно-часових умов процесу.

Значному поширенню дифузійної металізації заважають значна тривалість процесу і необхідність використання високих температур.

Хромування сталевих деталей здійснюють при температурі  $900\text{...}1400\text{ }^\circ\text{C}$  в порошковому, рідкому або газовому середовищах,

що містять хром. Тривалість процесу насичення становить 5...12 год, внаслідок чого на поверхні деталі утворюється дифузійний шар завглибшки 0,1...0,3 мм. Основна структура шару — твердий розчин хрому в залізі, на поверхні — карбіди ( $\text{Cr}_2\text{C}_6$ ), і  $(\text{Cr,Fe})_4\text{C}_3$ ; під ними розташовується евтектоїд ( $\alpha$ -розчин +  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ ).

Хромовані сталеві деталі мають підвищену окалиностійкість до температури 800 °С, високу корозійну стійкість, а при концентрації хрому в поверхневому шарі 0,3...0,4 % — підвищену твердість та зносостійкість. Хромують різні сталеві деталі та інструменти: клапани, вентилі, патрубки, штампи для холодного штампування тощо. Хромуванню можна піддавати деталі, виготовлені з будь-яких сталей. Термодифузійне хромування сталевих деталей виконують після їх механічної обробки. При цьому потрібно враховувати приріст розмірів при насиченні, який становить 0,03 мм на діаметр. Стійкість сталевих штампів, що піддавалися дифузійному хромуванню, підвищується в 10 разів, матриць холодного осадження — у 5 разів, гарячого осадження — у 3 рази, порівнюючи з нехромованими. Твердість карбідного шару хромованої сталі досягає 1200...1300 НV.

Основна мета алітування — підвищення жаростійкості та корозійної стійкості поверхні деталей зі сталі та чавуну (деталі газогенераторних машин, цементацийних ящиків, чохли термпар, лопатки газотурбінних машин тощо). Насичення поверхні виконують при температурі 950...1050 °С протягом 3...12 год, внаслідок чого утворюється шар завглибшки 0,1...1 мм. Основна його структура — твердий розчин алюмінію в  $\alpha$ -залізі; на поверхні можливим є утворення інтерметалідних фаз:  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{FeAl}$ ,  $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Алітований шар має високу опірність корозії на повітрі й у морській воді. Твердість алітованого шару — до 500 НV, зносостійкість низька.

Борування використовують для підвищення стійкості до спрацювання виробів, що експлуатуються при підвищених температурах і в агресивних середовищах. Насичення поверхні бором й утворення боридів відбувається при нагріванні виробів до температури 900...1000 °С у середовищах, які містять бор (2...5 год), або при електролізному боруванні в розплаві. Товщина боридного шару становить 0,05...0,4 мм, твердість досягає 2000 HV. Основна структура зміцненого шару — бориди FeB та FeAl<sub>3</sub>, під шаром боридів —  $\alpha$ -твердий розчин бору в залізі. Борування застосовують для підвищення зносостійкості втулок нафтових насосів, штампів, деталей прес-форм і ливарних машин тощо. Стійкість таких деталей після борування зростає у 2...10 разів.

Силіціювання — дифузійне насичення кремнієм поверхневих шарів виробів — виконують при температурі 950...1100 °С у відповідних середовищах. Тривалість витримки становить 2...12 год. Товщина дифузійного шару лежить у межах 0,15...0,8 мм. Дифузійний шар має підвищену стійкість до корозії в морській воді та кислотах, а також підвищену зносостійкість при відносно невеликій твердості (200...250 HV).

Дифузійне цинкування — процес, що полягає в насиченні поверхні сталі цинком при температурах 300...550 °С і 700...1000 °С у відповідному середовищі. Дифузійне цинкування використовують для підвищення корозійної стійкості сталі на повітрі, в бензині, мастилах, гарячих газах (300...500 °С), що містять сірководень. Цинкове покриття нестійке в кислотах та лугах.

Для підвищення корозійної стійкості різних виробів (листів, труб, дроту, посуду, апаратури для отримання спиртів, деталей газових компресорів тощо) частіше застосовують цинкування їх короткочасним (15...90 с) зануренням через флюс у розплавлений цинк (430...460 °С). Товщина утвореного шару при

цьому становить 0,02...0,03 мм. При цинкуванні сталі в порошку цинку (температура 350...450 °С, тривалість витримки 1...10 год) товщина дифузійного шару становить 0,03...0,08 мм. Цинкування сталі в парах цинку здійснюється при температурі 700...1000 °С. Утворена товщина шару досягає 0,15...0,2 мм і більше. Залежно від режиму насичення в дифузійному шарі на поверхні сталі може утворюватися  $\gamma$ -фаза (твердий розчин заліза в цинку), далі — шар інтерметалідних фаз  $\text{Fe}_2\text{Zn}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{Zn}_7$ ,  $\text{Fe}_3\text{Zn}$ , а ближче до серцевини — твердий розчин цинку в залізі.

Усе більшого поширення набуває сульфідкування залізовуглецевих сплавів — насичення поверхні виробів сіркою. Його здійснюють у сульфуризаторах, що містять хлористий калій, сульфат натрію, тіосульфат натрію, ціанистий натрій, карбамід та ін.; тому поверхня виробів одночасно насичується вуглецем й азотом. У зв'язку з цим такий процес називають сульфоціануванням. Після сульфідкування підвищується зносостійкість виробів; поліпшується адсорбція мастил на поверхнях деталей, які працюють в умовах тертя; запобігаються захоплення і здирання під час різання; поліпшується притирання деталей при терті. Тому сульфідують піддають високоточні деталі, що працюють в умовах тертя (наприклад, компресійні та мастилоз'ємні кільця двигунів внутрішнього згорання).

Комбінуючи набори компонентів, якими одночасно чи послідовно насичують поверхні деталей, можна здобувати широку гаму властивостей дифузійних шарів. Тому в практиці сучасної хіміко-термічної обробки виробів комбіноване насичення їхньої поверхні знаходить усе більше поширення.

### 3.6. Взаємодія металів з газами

При підвищенні температури збільшується хімічна активність металу, а його компоненти вступають у взаємодію зі складовими пічного середовища. Склад останнього в основному визначається способом нагрівання та обладнанням, що застосовується. Якщо метал нагрівається в полумєневих печах, то відбувається контакт з газоподібними продуктами спалювання палива: киснем, оксидами вуглецю, сірки, парами води, азотом, метаном. Газове середовище печей, які обігріваються теплообмінними нагрівниками різного типу, формується повітряною атмосферою, що складається з азоту, кисню, оксиду карбону (IV), водяної пари та інших газів.

Взаємодія металу з пічною атмосферою проявляється по різному і залежить від хімічного складу сплаву, складу пічного середовища та температури.

При надмірному вмісті в атмосфері печі окисних газів (кисню, оксиду карбону (IV), водяної пари тощо) відбувається окиснення сталі. Особливо небезпечним є наявність у пічних газах сполук сірки, оскільки поверхня сталі при цьому роз'їдається і швидкість окиснення прискорюється. У той же час взаємодія магнієвих сплавів з киснем при підвищенні вологості повітря та збільшенні вмісту оксиду сірки (IV) в ньому суттєво послаблюється.

Взаємодія пічних газів з металом може мати вибірковий характер, внаслідок чого змінюється хімічний склад поверхневого шару. Наприклад, водяні пари, водень і кисень зумовлюють зневуглецювання поверхні сталевих деталей (сухий водень не є зневуглецювальним газом). Сталь навуглецюють метан і вуглець (II). Швидкість процесів окиснення, зневуглецювання та навуглецювання сталі зростає з підвищенням температури.

Стосовно сталі оксид карбону (II) і водень є відновлювальними газами, а азот — нейтральним.

Швидкість процесу окиснення металу залежить від властивостей оксидів, що утворилися. Якщо окалина крихка чи легко відшаровується, що характерне для сталі, ніобію, танталу, деяких металів на основі міді, то товщина окисненого шару пропорційна тривалості витримки за заданою температурою. Інтенсивно окиснюються метали, оксиди яких при високих температурах легкоплавкі (ванадій) або леткі (молібден).

Тугоплавкі та щільні окисні плівки захищають метал від окиснення під час термообробки. Сталі, леговані хромом, нікелем, алюмінієм, кремнієм, мають досить високу окалиностійкість. Щільна плівка оксидів захищає від окиснення при підвищених температурах також алюмінієві сплави, проте водяна пара, аміак, сполуки сірки руйнують її та вступають у реакцію з металом.

Утворення окалини на поверхні деталі при нагріванні веде до втрати металу на додаткові припуски і потребує значних затрат на наступну механічну обробку чи зачищення. Зневуглецювання поверхні сталі зумовлює нерівномірну та неповну схильність її до гартування, внаслідок чого знижуються зносостійкість й утомлюваність металу деталей.

Під час взаємодії з металами складові пічної атмосфери можуть розпадатися з утворенням газів в атомарному стані. Останні мають високу дифузійну рухливість та здатні інтенсивно розчинятися в металі, змінюючи його хімічний склад і властивості.

Азот та кисень, розчиняючись у металі, можуть утворювати газонасичені дифузійні шари з високою твердістю, крихкістю (наприклад, у сплавах титану). Такі шари спричинюють появу тріщин під час обробки металу тиском, зварюванням, а в деяких випадках знижують корозійну стійкість виробів.



Найвищу дифузійну рухливість має водень. Проникаючи на велику глибину, він розподіляється по всьому об'єму металу і майже завжди погіршує його характеристики. Таку зміну властивостей металів називають водневою крихкістю. Її шкідлива дія проявляється у повільному руйнуванні деталей, насичених воднем, під дією навантажень.

Загальний результат взаємодії металу з атмосферою визначається співвідношенням складових її газів при заданій температурі. Штучно регулюючи це співвідношення, можна створити окиснювальну, відновлювальну, зневуглецьовану, навуглецьовану або нейтральну пічну атмосферу. Такі атмосфери називаються контрольованими. У сучасній технології термообробки металів вони знайшли широке застосування.

Використання контрольованих атмосфер, що захищають поверхні виробів при нагріванні, веде до підвищення міцності від утомленості та довговічності на 15...30 %, а економія металу внаслідок відсутності окалиноутворення може досягти 3 % маси садки. Тому необхідний захист поверхні виробів при їх нагріванні для термообробки, а також при перенесенні в охолодне середовище під час гартування.

Контрольовані атмосфери створюють у спеціальних газопідготовчих установках — генераторах і вводять у робочий простір печі.

Основні вимоги до контрольованих атмосфер:

- надійний захист металу від взаємодії з газами;
- можливість контролювання і регулювання складу атмосфери;
- вибухова безпечність і нетоксичність газової суміші;
- можливість створення з дешевої та недефіцитної сировини.

### 3.6.1. Призначення, склад і способи створення контрольованих атмосфер

Залежно від характеру взаємодії з металами контрольовані атмосфери поділяють на три групи: нерівноважні (або агресивні) атмосфери, рівноважні атмосфери та інертні гази.

Нерівноважні атмосфери не утворюють у процесі взаємодії з металом сполук, що загальмовують процес. Реакції взаємодії відбуваються лише в одному напрямку. Типовим прикладом такої атмосфери є система  $O_2-N_2$  (наприклад, повітряна атмосфера, яка для більшості металів є окисною).

Рівноважні атмосфери містять гази, характер взаємодії яких із металом протилежний. Вони рівноважні при певній температурі. При відхиленні температури від рівноважної проявляється той чи інший напрямок реакції їх із металом.

За призначенням рівноважні атмосфери поділяють на кілька груп: захисні, окисні, науглецьовувальні, спеціальні та ін. Розглянемо деякі з них. Залежно від складу та характеру взаємодії з металами вони поділяються на кілька типів:

- водень — водяна пара — азот;
- водень— водяна пара — оксид карбону (II)— азот;
- оксид карбону (II) — оксид карбону (IV) — азот;
- оксид карбону (II) — оксид карбону (IV) — водень — водяна пара — азот;
- азот — оксид карбону (II) — водень;
- водяна пара.

До атмосфер першої групи ( $H_2-H_2O-N_2$ ) належать продукти дисоціації аміаку та чистий водень. Вони застосовуються при термообробці нержавіючих і жароміцних сталей, а також деяких сплавів кольорових металів.

При термічній дисоціації аміаку в присутності каталізатора за реакцією  $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{N}_2$  створюють атмосферу, що містить до 75 % водню та 25 % азоту. Таку атмосферу позначають ДА. При неповному спалюванні продуктів дисоціації аміаку з коефіцієнтом витрати повітря  $a = 0,7 \dots 0,9$  (у генератор подається 70...90 % повітря від потрібного для повного спалювання) створюють атмосферу, що містить 1...15 % водню, решта — азот. Таку атмосферу позначають ПСА-08.

Для створення в печах водневої атмосфери (її позначають В) використовують технічний водень у балонах або водень, який отримують електролізом води та дисоціацією аміаку.

Перед застосуванням атмосферу сушать алюмогелем, силікагелем або цеолітом. Ступінь осушування характеризується точкою роси — температурою початку конденсації водяної пари з газової суміші. Атмосфери ДА і В сушать до точки роси 40—75 °С, атмосферу ПСА-08 — до точки роси 20—40 °С. У зв'язку з високим вмістом водню ці атмосфери вибуховонебезпечні.

Атмосфери другої групи ( $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O-CO-M}_2$ ) створюють неповним спалюванням вуглеводневих газів (природного, світильного, коксуючого та ін.) у присутності каталізатора з коефіцієнтом витрати повітря  $a = 0,25 \dots 0,28$  (позначення ПС-0,25). Вони містять близько 20 % оксиду карбону (II), 40 % водню, а решта — азот. Їх сушать до точки роси +10...–20 °С.

Горіння газу при створенні цієї атмосфери відбувається в умовах нестачі повітря і потребує додаткового введення теплоти в реакційну зону. Для цього генератор обігривають зовні. Створену в такий спосіб атмосферу називають ендотермічною, або ендогазом (від грецького слова «ендо» — всередині).

Ендогазову атмосферу, додатково очищену від оксиду карбону (IV), позначають ПС-Е, а суху й очищену — ПСС-Е.

Ендогазова атмосфера є відновлювальною. Вона застосовується при термообробці середньо- і високовуглецевих сталей. У зв'язку з високим вмістом оксиду карбону (II) та водню ця атмосфера токсична й вибуховонебезпечна.

Атмосфери третьої групи ( $\text{CO-CO}_2\text{-M}_2$ ) — це генераторні гази, які отримують при пропусканні повітря крізь нагріте деревне вугілля в газогенераторі. Їх позначають ГУ-БО (генераторний газ, здобутий в генераторі з зовнішнім нагріванням). Вони містять 25...34 % оксиду карбону (II), до 2 % оксиду карбону (IV), до 6 % водню, близько 1 % метану, а решта — азот. Після очищення від оксиду карбону (IV) і сушіння до точки роси  $+20\text{...}-25\text{ }^\circ\text{C}$  їх позначають ГГ-О.

Атмосферу генераторного газу застосовують при термообробці чавунів. Нині деревновугільні атмосфери замінюють природним газом.

Атмосфери четвертої групи ( $\text{CO-CO}_2\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O-N}_2$ ) створюють неповним спалюванням вуглеводневих газів з коефіцієнтом витрати повітря  $a = 0,6\text{...}1$ . Багаті атмосфери мають високий вміст оксиду карбону (II) (8...12 %) і водню (15...20 %), бідні — невелику кількість цих газів, але вони багаті оксидом карбону (IV) (до 10 %) й азотом (до 88 %). Їх позначають відповідно ПС-06 та ПС-09. Після охолодження атмосфери ПС-06 у рефрижераторі до точки роси  $4\text{ }^\circ\text{C}$  утворюється суха атмосфера ПСС-06.

Атмосфери ПС-06 і ПС-09 піддають також глибшому сушінню до точки роси  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  й очищенню від оксиду вуглецю (IV) в розчині моноетаноламіну. В цьому разі вони мають позначення ПСО-06 та ПСО-09. За вмістом ці атмосфери відповідають атмосферам п'ятої групи ( $\text{N}_2\text{—CO—H}_2$ ) і мають велику кількість азоту (72 % та 96 % відповідно). Ці атмосфери найширше використовують при термообробці більшості марок сталей (крім не ржавію-

чих). У зв'язку з низьким вмістом оксиду карбону (II) і водню вони нетоксичні та вибуховобезпечні.

Спалювання газу під час створення цих атмосфер відбувається при значно більшій кількості повітря і супроводжується виділенням теплоти. В цьому разі зовнішнє обігрівання генератора непотрібне, тому створену атмосферу називають екзотермічною, або екзогазом (від грецького слова «екзо» — зовні).

Екзотермічні атмосфери більш економніші. Вони характеризуються високою відновлювальною здатністю та можуть незначно знеуглецьовувати сталі. Їх застосовують при термообробці виробів, якщо знеуглецювання не має суттєвого значення. Водяна пара та оксиди карбону окиснюють хром, тому екзогаз не використовують при термообробці нержавіючих сталей.

Рівноважність ендо- й екзогазових атмосфер із металом залежить від температури, хімічного складу сталі та складу газу. Оскільки температура і склад металу при термообробці встановлюються заздалегідь, рівновагу регулюють складом атмосфери. Для цього змінюють вміст у ній водяних парів (точку роси), додають газ (водень, метан та ін.).

При доданні до ендо- й екзогазових атмосфер невеликої кількості (5...10 %) природного газу отримують карбюризатор, що не спричинює коксо- і сажоутворення. Цементувальну здатність такого карбюризатора можна легко регулювати автоматично.

Цементувальна активність газової атмосфери характеризується вуглецевим потенціалом. Його визначають процентним вмістом вуглецю на поверхні цементованого шару, що перебуває в рівновазі з атмосферою при заданій температурі. Вуглецевий потенціал регулюють зміною вмісту природного газу в атмосфері.

Атмосферу водяної пари використовують при відпуску сталей (особливо інструментальних) в інтервалі температур 350...650 °С. При взаємодії з паром на поверхні металу утворю-

ється тонка тверда окисна плівка темно-синього кольору, що поліпшує товарний вигляд і стійкість інструмента. Для цього використовують перегріту (суху) пару. Її підводять до металу, нагрітого до температури не нижче 100 °С.

Розглянуті вище атмосфери непридатні як захисні середовища при термообробці активних металів (титану, цирконію, ванадію, ніобію, танталу та ін.) і сплавів на їх основі. В цьому разі більш придатним захисним середовищем будуть інертні гази або вакуум.

Інертні гази (аргон і гелій) захищають метал від окиснення та знеуглецювання. Перед використанням їх піддають очищенню від домішок (кисню, водню, оксиду карбону (IV)) і сушінню до точки роси — -50...-55 °С. Інертні гази дефіцитні й дорогі, але нетоксичні та вибуховобезпечні.

Термообробку деяких легованих сталей і жароміцних сплавів можна виконувати також у середовищі сухого азоту, який заздалегідь очищають від домішок. Азотну атмосферу позначають А.

Для термообробки жароміцних сплавів і сплавів на основі тугоплавких металів як захисне середовище найчастіше застосовують вакуум з залишковим тиском газів до 10~3 Па. В робочому просторі печі вакуум утворюється при відкачуванні повітря пароструминними та мастильними насосами.

Захист металу у вакуумі значно дешевший порівняно з захистом інертними газами, а в деяких випадках — порівняно з захисними рівноважними атмосферами завдяки зменшенню витрат на його приготування, скороченню виробничих площ й обслуговуючого персоналу. Недолік високого вакууму — можливість збіднення сплавів легуючими компонентами при високих температурах нагрівання через їх випаровування.

Практичні рекомендації наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12. Застосування контрольованих атмосфер

Матеріали виробів	Світлий відпал	Світла нормалізація	Світле гартування	Світлий відпуск
1	2	3	4	5
Чавун ковкий	ГГ; ГГ-ВО ГГ-С; ПС-06 ПСС-06 ПСО-06 ПСО-09	-	-	-
Маловуглецеві сталі	ДА; ПСА-08 ПСО-06 ПСО-09	ПСА-08 ПСС-06 ПСО-09 ГГ-С	-	ПСО-09 А
Середньо- і високовуглецеві сталі	ГГ-ВО ПСО-06 ПСО-09	ГГ-ВО ПСО-06 ПСО-09 ПСС-Е	ПСО-06 ПСО-09 ПСС-Е	ПСО-09 А
Середньо- і високолеговані сталі	ПСО-06 ПСО-09	ПСО-06 ПСО-09 ПСС-Е ГГ-ВО	ПСО-06 ГГ-ВО	ПСО-09 А
Леговані інструментальні сталі	ПСО-06 ПСО-09	ПСО-06 ПСО-09	ПСО-06	ПСО-09 А
Нержавіючі сталі	ДА; В ПСА-08 Вакуум (1Па)	ДА; В ПСА-08	ДА; В ПСА-08 Вакуум (1Па)	ПСА-08
Жароміцні сплави на основі нікелю	-	-	Вакуум (1Па) Аргон; гелій; В; ДА; ПСА-08	Вакуум (1Па) Аргон Гелій
Електротехнічні сталі та трансформаторне залізо	ДА; ПСА-08 В; Вакуум (10 <sup>-1</sup> Па)	-	-	-

Продовження таблиці 3.12

1	2	3	4	5
Мідь, бронза	ПС-09 ПСО-09	-	-	-
Титанові сплави	Аргон; гелій Вакуум ( $10^{-2}$ Па)	-	Аргон; гелій Вакуум ( $10^{-2}$ Па)	-

Використання контрольованих атмосфер при термообробці забезпечує отримання світлої неокисненої поверхні деталей, що дає змогу зменшити припуски, витрати на механічну обробку чи травлення. Крім того, завдяки використанню захисних атмосфер поліпшуються експлуатаційні властивості деталей.

### 3.7. Дефекти хіміко-термічної обробки металів

Основними факторами появи дефектів при хіміко-термічній обробці металів є порушення призначених режимних параметрів процесу, недотримання умов виконання допоміжних операцій та незадовільна якість матеріалів.

Найпоширенішими дефектами, що можуть виникнути практично при будь-якій хіміко-термічній обробці металів, є:

- недостатня або завищена концентрація насичувального компонента в дифузійному шарі;
- недостатня чи завищена його глибина;
- недостатня або завищена твердість шару;
- «плямистий» розподіл поверхневої твердості;
- тріщини, деформація (короблення) виробів;
- окиснення, знеуглецювання, оплавлення, роз'їдання поверхні тощо.



Причинно-наслідковий зв'язок появи дефектів може мати досить складний характер, що потрібно враховувати, розробляючи заходи щодо їх попередження. Наприклад, поява цілого ряду дефектів при хіміко-термічній обробці металів пов'язана з відхиленням концентрації насичувального компонента від оптимального значення, яка може виникнути внаслідок недотримання температури, тривалості витримки, активності насичувального середовища, швидкості дифузії насичувального компонента в оброблюваному металі та ін.

Якщо при підвищенні температури активність насичувального середовища зростає швидше, ніж швидкість дифузії насичувального компонента, то концентрація останнього в поверхневому шарі буде підвищуватись. У свою чергу, це може призвести до підвищення твердості, а разом із цим навіть крихкості поверхні, її розтріскування та ін. Така сама ситуація створюється при зниженні температури, якщо активність насичувального середовища буде зменшуватись повільніше порівняно з уповільненням дифузійних процесів. Тому при встановленні причин появи дефектів та розробці заходів щодо їх попередження потрібно враховувати якомога більшу кількість факторів, які впливають на проходження процесу в конкретних умовах.

Узагальнені рекомендації про попередження появи дефектів при цементації та азотуванні сталі наведено в таблицях 3.13, 3.14.

Знання закономірностей протікання дифузійних процесів дає можливість підібрати способи виправлення деяких видів дефектів хіміко-термічної обробки. Так, додаткова витримка деталей з підвищеною (зниженою) концентрацією компонента, який дифундує в поверхню, в середовищі з меншою (вищою) активністю приводить до оптимізації дифузійних процесів і отримання відповідних властивостей поверхні (усуваються крихкість, лущення тощо).

Тільки чітке дотримання режимних параметрів та інших умов технологічного процесу хіміко-термічної обробки металів гарантує випуск високоякісної продукції.

Таблиця 3.13. Види браку при цементації сталі

Вид браку	Причина	Заходи для попередження
1	2	3
Надто велика глибина цементованого шару	Завищена тривалість витримки при цементації сталі Застосування активного карбюризатора Висока температура цементації сталі Нерівномірна температура в печі	Усунути причини, які обумовлюють брак
Занижена глибина цементованого шару	Недостатня витримка при цементації сталі Занижена температура цементації сталі Застосування не досить активного карбюризатора Нерівномірна температура в печі Недостатня подача газу при газовій цементації сталі	Дотримання режиму технологічного процесу  Ретельне дозування цементувальних речовин
Підвищена концентрація вуглецю в цементованому шарі	Застосування активного карбюризатора і завищена тривалість витримки при цементації сталі	Дотримання режиму технологічного процесу
Знижена концентрація вуглецю в цементованому шарі	Застосування не досить активного карбюризатора	Ретельне дозування цементувальних речовин

Продовження таблиці 3.13

1	2	3
Нерівномірна глибина цементованого шару	Замашена і забруднена поверхня виробу  Неправильна упаковка цементацийних ящиків	Очитка поверхні виробу перед цементациєю від жиру, бруду, окалин Ретельна герметизація цементацийних ящиків Ущільнення карбюризатора в цементацийних ящиків
Нерівномірна глибина цементованого шару	Відкладання сажі при газовій цементациї сталі	Ретельне дозування цементувальних речовин
Відшарування загартованого цементованого шару	Різкий перехід від цементованого шару до серцевини, наявність цементитної сітки	Зменшення вмісту свіжого карбюризатора
Крихкість (викришування) поверхневого цементованого шару	Застосування активного карбюризатора Завищений час витримки сталі	Зменшення активності карбюризатора Дотримання режиму технологічного процесу
Склоподібні напливи на поверхні деталі	Наявність кварцового піску в карбюризаторі	Не допускати потраплення кварцового піску в карбюризатор

Таблиця 3.14. Види браку при азотуванні сталі

Вид браку	Причина	Заходи для попередження
1	2	3
Занижена поверхнева твердість при нормальній глибині азотованого шару	Підвищена температура процесу, високий ступінь дисоціації аміаку, перерва в його подачі	Дотримання режиму технологічного процесу

Продовження таблиці 3.14

1	2	3
<p>“Плямиста“ (нерівномірна) твердість азотованого шару</p>	<p>Затікання олова на поверхню виробу, що має азотуватись</p> <p>Недостатнє знемащення поверхні виробу</p> <p>Неповне виконання процесу</p>	<p>Після лудіння і зачистки меж покриття виконати фосфатування поверхні виробу</p> <p>Ретельне знемащення поверхні виробу</p> <p>Дотримання режиму технологічного процесу</p>
<p>Лушіння і розтріскування азотованого шару</p>	<p>Висока концентрація азоту в поверхневому шарі виробу</p> <p>Внутрішнє напруження в азотованому шарі</p>	<p>Після закінчення технологічного процесу додатково витримати виріб в атмосфері аміаку для прискорення дифузії азоту вглиб виробу.</p> <p>Виведення крихкого поверхневого шару, що має високу концентрацію азоту</p> <p>Стабілізуючий відпуск сталі</p>
<p>Деформація азотованих деталей</p>	<p>Нерівномірне нагрівання деталей при азотуванні</p> <p>Наявність залишкових напружень у деталі після її механічної обробки перед азотуванням</p>	<p>Перевірити розподіл температури в печі, Вжити заходів для ліквідації перепаду температур у ній</p> <p>Стабілізуючий відпуск сталі для зняття внутрішніх напружень перед азотуванням деталі</p>

## ГЛАВА 4

### ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

#### 4.1. Класифікація обладнання для термічної обробки

Обладнання для термічної обробки поділяється на три групи:

*Основне обладнання* застосовується для виконання основних технологічних операцій термообробки. До нього належать нагрівальні печі й установки, механізовані агрегати, установки для приготування захисних атмосфер, обладнання для охолодження (гартівні баки і машини, установки для обробки металу холодом тощо).

*Додаткове обладнання* включає устаткування для виправлення й очищення деталей (гідравлічні та механічні правильні преси, травильні установки, мийні машини, дробо- і гідропіскоструминні апарати та ін.).

До *допоміжного обладнання* належать контрольно-вимірювальна апаратура, пристрої для охолодження гартівних рідин, підйомно-транспортне, санітарно-технічне обладнання тощо.

Нагрівальні печі й установки класифікують за кількома ознаками.

За технологічним призначенням їх поділяють на *універсальні, відпалювальні, гартівні, відпускні, цементаційні, спеціального призначення*.

За температурою розрізняють *низько-, середньо- і високо-температурні* печі й установки.

За видом палива або теплової енергії печі та нагрівальні установки поділяють на *мазутні, газові й електричні*.

Залежно від конструкції, характеру завантаження і розвантаження нагрівальні печі та установки поділяють на *камерні, шахтні, ковпакові, ванні* — періодичної дії, та *карусельні, барабанні, конвеєрні, штовхальні, шнекові* — безперервної дії.

За характером середовища в робочому просторі розрізняють нагрівальні печі та установки з окисною (повітряною) атмосферою, контрольованими атмосферами (нейтральними, відновлювальними, науглецювальними та ін.), печі-ванни (мастильні, з розплавом солей, лугів, металів), вакуумні печі.

Для позначення печей прийнято літерно-цифрову індексацію. Значення перших чотирьох літер індексу печі наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Літерна індексація печей для термообробки виробів

Перша літера		Друга літера		Третя літера		Четверта літера	
Нагрівання		Основна конструктивна ознака		Характер середовища		Особливості	
Г	Газове	А	Карусельна	А	Азот	А	Агрегат
С	Електричне	Б	Барабанна	В	Вакуум	Л	Лабораторна
І	Індукційне	В	Ванна	Г	Метали	В	Вертикальна
Т	Полуменево	Г	Ковпакова	З	Захисна атмосфера	М	Механізована
		Д	Із викотним подом	М	Мастило	Н	Безперервної дії
		Е	Із підвісним конвеєром	О	Окисна атмосфера	П	Періодичної дії
		И	Пульсуючим подом	П	Пара водяна - вода		
		К	Конвеєрна	С	Сіль (селітра)		
		Н	Камерна	Ц	Цементацийний газ		
		П	Протяжна				
		Р	Рольгангова				
		Т	Штовхальна				
		Ш	Шахтна				
		Э	Елеваторна				

Групи цифр після літер означають розмір в (дм):

- *перша група* — ширина поду (для печей з обертовим подом — зовнішній діаметр робочої поверхні поду);

- *друга група* — довжина поду (для печей з обертовим подом — ширина поду);
- *третья група* — висота робочого простору печі або максимальна висота завантажувального вікна.

Цифри розділяються крапками і записуються в чисельнику, а в знаменнику вказуються гранична робоча температура печі в сотнях градусів Цельсія, а після неї через дефіс позначаються допоміжні ознаки: для полуменевих печей — рід палива (**Г** — газ, **М** — мазут); для електричних печей — літери: — **М** — механізована, **Х** — камера охолодження, **П** — періодичної дії, **М** — металевий тигель (для ванних печей), **К** — ківш (для карусельних печей). Цифри після цих літер для конвеєрних та штовхальних печей вказують довжину камери охолодження (дм).

Найважливіші техніко-економічні характеристики печей:

- розміри робочого простору, мм;
- робоча площа поду або розміри піддона, мм;
- максимальна температура, °С;
- максимальна продуктивність, кг/год;
- максимальна маса одноразового завантаження, т;
- встановлена потужність, кВт;
- тип атмосфери в робочому просторі та об'ємні витрати захисного газу, м<sup>3</sup>/год;
- габаритні розміри, мм.

## 4.2. Вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали

Температура в робочому просторі печі досягає 1400 °С, а в деяких печах вона сягає 3000 °С і може різко змінюватися при завантаженні холодного металу. Мурування поду робочого простору сприймає тиск металу, що нагрівається, та удари при його завантаженні. Воно піддається руйнівній фізико-хімічній дії окалини і шлаку. Тому до матеріалів, з яких виготовляють елементи

конструкції внутрішньої будови нагрівальних печей, установлюють досить жорсткі вимоги.

Ці матеріали повинні мати високу вогнетривкість, достатню механічну міцність при високих температурах, високу термічну стійкість, а також чинити опір хімічному впливу нагрітого металу і димових газів.

Вогнетривкі матеріали застосовують для внутрішнього облицювання (футерування) термічних печей та іншого обладнання, яке перебуває під дією високих температур.

Вогнетривкість матеріалів вимірюється в °С.

Вогнетривкі матеріали застосовують у вигляді цегли різних розмірів і форм, а також порошків і розчинів, необхідних для заповнення швів між цеглою при кладці термічних печей та іншого обладнання.

За хімічним складом вогнетривкі матеріали поділяють на кислі, основні та нейтральні.

*Кислі вогнетриви* містять не менше 90 % кремнезему ( $\text{SiO}_2$ ) і мають яскраво виявлені кислотні властивості. До кислих вогнетривів належать вироби, виготовлені з природних кварцових матеріалів, які називаються *динасовими*. Вогнетривкість динасу залежно від вмісту кремнезему сягає 1730 °С і вище.

*Основні вогнетриви* мають чітко виявлені основні властивості. Складаються ці вогнетриви переважно з окису магнію  $\text{MgO}$  і окису кальцію  $\text{CaO}$  (магнезит, хромомагнезит, доломіт та ін.). Перелічені матеріали після випалювання мають високу вогнетривкість (доломіт — 1800—1950 °С, магнезит і хромомагнезит — не нижче 2000 °С).

До *нейтральних вогнетривів* належать глиноземисті матеріали (шамот, вогнетривка глина) і вуглецевмісні вогнетривкі матеріали (графітові і вугільні вогнетриви), а також хромітові вогнетриви (порошок хромистого залізняку і хромітова цегла). Вогнетривкість шамотних виробів — 1630—1770 °С, хромітових — 1800 °С, графітових — понад 2000 °С.



### 4.3. Джерела теплової енергії

Для отримання теплової енергії в термічних печах застосовують рідке та газоподібне паливо, а також електричну енергію.

Як рідке паливо використовують мазут. Однак мазут має велику в'язкість, погано розпилюється, ускладнює автоматизацію теплового режиму печей і погіршує санітарно-технічні умови в цеху, оскільки при спалюванні мазуту виділяється багато диму. Тому печі, в яких використовують мазут замінюють на печі, що працюють на газоподібному паливі або електричній енергії.

Рідке паливо спалюють у печах за допомогою форсунок низького тиску.

В якості газоподібного палива застосовують природний або генераторний газ. При проектуванні потужних печей та агрегатів віддають перевагу газовому нагріванню, тому що вартість одиниці теплоти при спалюванні газу в 4...5 разів менша, ніж при використанні електричної енергії.

Газ спалюють у пальниках низького і високого тиску, та у радіаційних трубах. На рис. 4.1, а показано схему дифузійного пальника низького тиску.

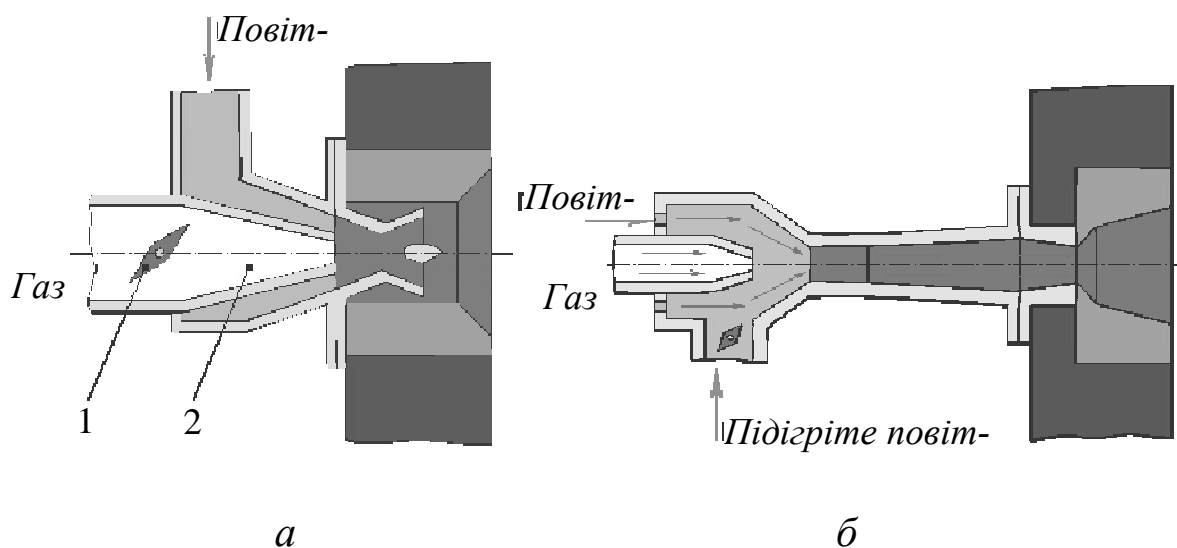


Рис. 4.1. Схеми дифузійних пальників

Подача газу в пальник регулюється клапаном 1. Холодне повітря, що подається в пальник, обмиває й охолоджує газове сопло 2. В дифузійних пальниках повне змішування газу та повітря відбувається в робочому просторі печі.

До пальників високого тиску належать інжекторні пальники. Необхідне для спалювання газу повітря в них засмоктується (інжектуються) струменем газу, який подається під високим тиском, або навпаки, газ інжектуються повітрям. Утворення газоповітряної суміші в такому пальнику повністю завершується в камері змішування (рис. 4.1, б). Завдяки змішуванню газу з повітрям інжекторні пальники працюють із малим надлишком повітря і дають безполуменеве горіння з вищою температурою, ніж дифузійні пальники.

Для економії палива та підвищення температури полум'я в пальники подають повітря, підігрите вихідними пічними газами. Для цього печі обладнують регенераторами і рекуператорами.

У сучасних безмуфельних печах газ спалюється в радіаційних (випромінювальних) трубах. На одному кінці такої труби вмонтовано пальник, а через інший виводять продукти спалювання. В таких печах продукти спалювання ізольовані від робочого простору, що дає змогу вести нагрівання оброблюваних деталей в контрольованій атмосфері. На рис. 4.2 показано схему одного з варіантів радіаційної труби.

Холодне повітря подається по трубі рекуператора 1 і, нагріваючись завдяки теплоті газів, які виходять крізь патрубков, інжектуються пальником 5. Газ надходить у пальник по трубі 6 та спалюється в радіаційній трубі 4, стінки якої нагріваються і випромінюють теплоту в робочий простір печі. Продукти спалювання відводяться через трубу регенератора 2 витяжною системою. Радіаційна труба кріпиться до стінки печі 3.

При використанні радіаційних труб сучасних конструкцій з рекуператорами ККД газових печей досягає 70 %, що практично дорівнює ККД електричних печей (70...75 %), але значно більше,

ніж ККД звичайних теплових печей (12...25 %), робоча температура в яких досягає 900...1150 °С.

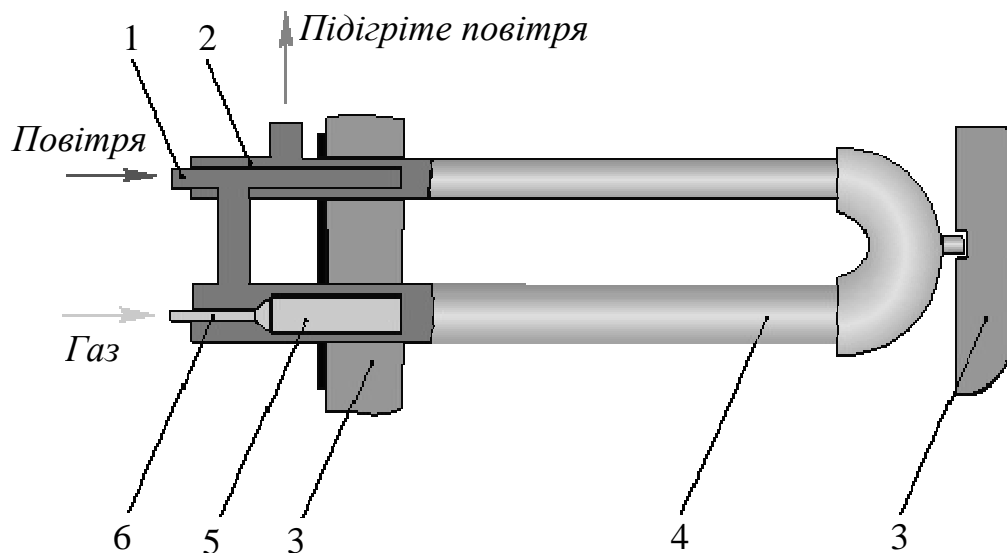


Рис. 4.2. Схема радіаційної труби

У високотемпературних вакуумних печах та печах із нейтральними атмосферами встановлюють графітні нагрівники у вигляді стрижнів, труб, пластин тощо. Максимальна робоча температура їх становить 3000 °С.

## 4.4. Нагрівальні печі та установки

### 4.4.1. Камерні печі

Для нагрівання деталей дрібних та середніх розмірів у термічних цехах одиничного і серійного виробництва широко застосовують камерні печі періодичної та безперервної дії. Камерні печі прості за конструкцією, універсальні за призначенням і можуть працювати на рідкому та газоподібному паливі або на електричній енергії. На рис. 4.3 показано конструкцію термічної камерної печі, що працює на мазуті.

Піч складається з прямокутної камери, футерованої шамотною цеглою 2 та перекритої склепінням, розміщеній в корпусі 1 із листової сталі. Форсунки низького тиску 3 встановлено в торці печі. Спалювання палива відбувається в опалювальній камері 4, розміщеній під піддоном 6. Гарячі гази, які утворилися при спалюванні палива, по вертикальному каналу 8 подаються в робочий простір 7, нагрівають деталі 11 і, пройшовши горизонтальні канали 9, виходять через димову трубу.

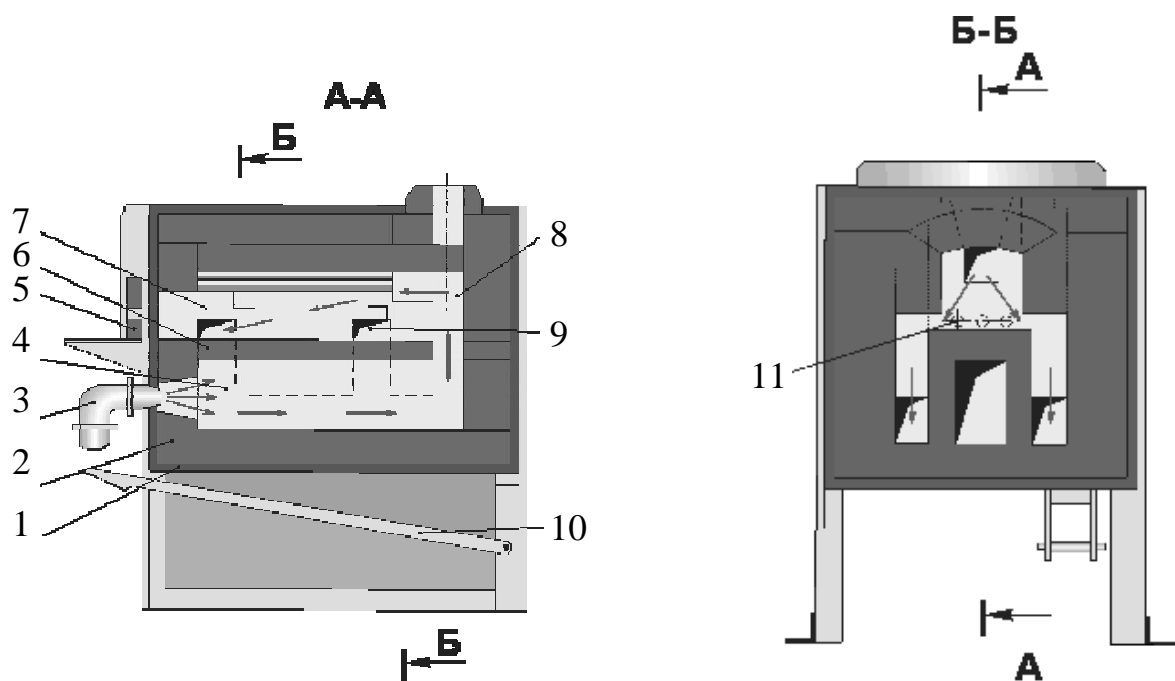


Рис. 4.3. Термічна камерна піч

Деталі нагріваються теплотою гарячих газів та теплотою, яку випромінюють нагріті стінки, під і склепіння печі. Завантаження та розвантаження деталей здійснюються через віконце, що закривається заслінкою 5 за допомогою педального пристрою 10. Площа поду становить  $0,32 \text{ м}^2$ . Максимальна температура в печі —  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , продуктивність —  $30 \text{ кг/год}$ , витрати мазуту —  $6...8 \text{ кг/год}$ .

Основні недоліки таких печей: відсутність механізмів завантаження та розвантаження, часте прогорання поду.

Камерна піч з підподовими топками може працювати також на газоподібному паливі. Такі печі часто обладнують рекуператорами для підігрівання повітря, яке подається в пальники, теплою продуктів спалювання.

У термічних відділеннях інструментальних і механічних цехів установлюють камерні газові печі з кульовим подом. На поду такої печі є чотири жолоби, в які поміщають кулі з жароміцної сталі. Кулі переміщаючись по жолобах полегшують пересування піддонів з деталями або цементацийних ящиків при завантаженні та розвантаженні печі. Піч має інжекторні пальники. Температура в печі контролюється термопарою. Піч працює на природному газі з витратою 35...45 м<sup>3</sup>/год. Максимальна температура в печі становить 950°C. Розміри поду печі — 1150×1900 мм, висота вікна — 520 мм. Продуктивність печі при цементації — 25 кг/год, при гартуванні й нормалізації — 200...250 кг/год.

Для термообробки великогабаритних виробів, виливків, поковок, сортового і листового прокату застосовують камерні печі з викотним подом (індекс ТДО). Футерований під таких печей пересовується на колесах або котках по рейкових чи жолобкових направляючих за допомогою лебідки. Печі з викотним подом опалюються природним газом або мазутом. Контроль температури автоматичний. Максимальна температура нагрівання металу становить 1150 °С при максимальній масі садки 300 т. При використанні контрольованих атмосфер у печах із викотним подом (індекс ТДЗ) садку металу муфелюють. Муфель — герметична камера з вогнетривкої цегли (жароміцної сталі), яка захищає вироби, що нагріваються, від контакту з продуктами згоряння палива. Кінцева температура нагрівання металу в печах ТДЗ становить 900 °С при максимальній масі садки до 12 т.

Електричні печі з викотним подом виготовляються серійно. Печі призначені для роботи при температурах до 700 °С (*низькотемпературні*), до 1000 °С (*середньо-температурні*) та до 1250 °С (*високотемпературні*). Нагрівники в цих печах розміще-

но на стінах камери і поді (візок). Потужність великих електричних печей з викотним подом досягає 3...5 МВт.

Камерні електричні печі опору найпростіші за конструкцією та зручні в керуванні. Випускаються серійно на робочу температуру до 1250 °С з металевими нагрівниками (серія СНО — з окисною атмосферою, серія СНЗ — захисною), а на робочу температуру до 1600 °С — із нагрівниками з карборунду і дисиліциду молібдену (серія Г).

Усі серійні печі на максимальну робочу температуру 700 °С оснащено вентиляторами, що інтенсифікують процес нагрівання та збільшують рівномірність розподілу температури в робочому просторі печі. На рис. 4.4 показано конструкцію камерної електричної печі опору типу СНЗ.

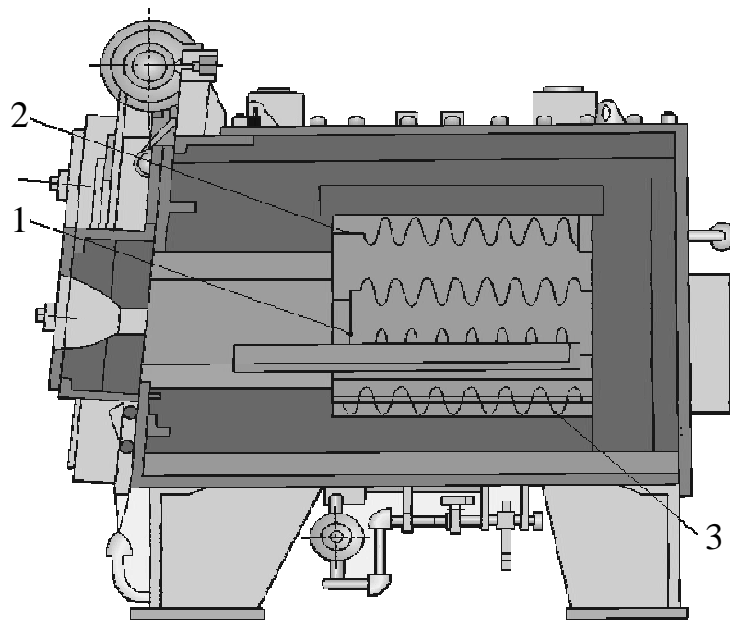


Рис. 4.4. Камерна електрична піч опору типу СНЗ

Піч нагрівається металевими елементами, розміщеними на бічних стінах 1, склепінні 2 та під подовою плитою 3. Живлення печі здійснюється від мережі трифазного струму. Захисна атмосфера подається до дверцят печі. При їх відкриванні вона займається і створює половеу газову завісу. Залежно від потужності

печі дверцята мають педальний, пневматичний або електромеханічний приводи. Максимальні розміри робочого простору печей серій СНО та СНЗ становлять 2300×4600×1500 мм. Печі застосовують для відпуску, відпалу, нормалізації та гартування деталей і виробів.

Конструкцію електричної печі типу Г-30А з карборундовими нагрівниками зображено на рис. 4.5.

Карборундові нагрівники 2 по чотири штуки розміщено горизонтально під склепінням 1 і подом 3 печі. Піч живиться від трансформатора з кількома ступенями напруги. В деяких конструкціях таких печей використовують контрольовані атмосфери.

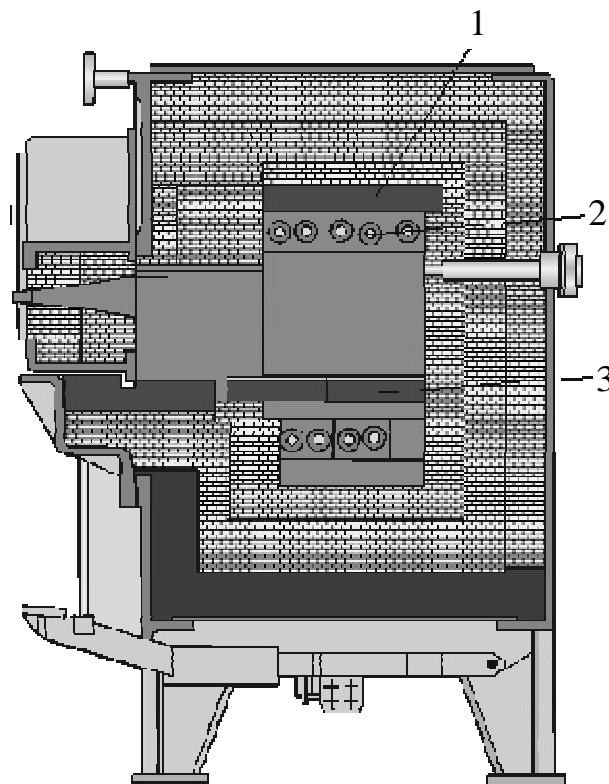


Рис. 4.5. Електрична піч типу Г-30А з карборундовими нагрівниками

Технічна характеристика печі: робоча температура 1300 °С; розміри робочого простору 300×400×250 мм; потужність 30 кВт; продуктивність 50 кг/год. Недолік таких печей — частий вихід з ладу карборундових нагрівальних елементів.

У всіх типах камерних електричних печей температура вимірюється за допомогою термопар та регулюється автоматично. До загальних недоліків цих печей належать: тривале нагрівання виробів, оскільки передача теплоти відбувається лише випромінюванням; необхідність заземлення за технікою безпеки; висока вартість електричної енергії.

Камерними печами періодичної дії є нагрівальні установки типу ПАП (печі аеродинамічного підігрівання). Вони працюють на принципово новому методі обігрівання, що ґрунтується на генерації теплоти внаслідок руху повітря з великою швидкістю у замкненому просторі. Ці печі застосовують для нагрівання під гартування деталей з алюмінієвих і магнієвих сплавів.

Схему печі ПАП-9 показано на рис. 4.6.

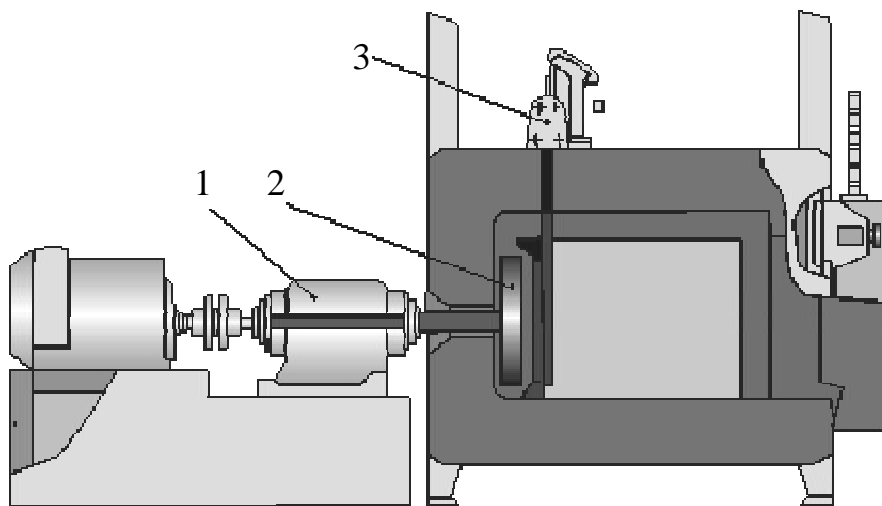


Рис. 4.6. Схема печі аеродинамічного підігрівання

Потік повітря або газу в пічному просторі створюється ротором відцентрового вентилятора 2 з профільованими лопатками, які приводяться в рух електродвигуном 1. Контроль режиму роботи та теплового ефекту здійснюється регулятором потужності 3. Передача теплоти деталям відбувається конвективним способом, що забезпечує прискорене підігрівання їх та високу рівномірність температури по всьому об'єму печі.



Технічна характеристика печі ПАП-9: робоча температура  $500+3$  °С; розміри робочої камери  $1500 \times 1100 \times 1100$  мм; частота обертання ротора  $1460 \text{ хв}^{-1}$ ; потужність приводу 40 кВт.

Завантаження деталей в камерні електричні печі здійснюється вручну, краном або за допомогою завантажувальних механізмів, які встановлюються перед дверцятами печі.

#### 4.4.2. Шахтні печі

Шахтні печі використовують для термічної та хіміко-термічної обробки великогабаритних та невеликих деталей (зубчастих коліс, втулок та ін.), розташованих у спеціальних контейнерах або кошиках. Розміщення довгих деталей в печі в підвішеному стані забезпечує їм мінімальну деформацію.

Шахтна піч — це футерована шахта циліндричного або квадратного перерізу. Каркас печі виконаний з листової сталі. Робочий простір печі перекривається кришкою, яка може мати ручний, пневматичний або електромеханічний приводи.

Для зручності обслуговування шахтні печі будують в приямку на бетонному фундаменті. Печі розміщуються в зоні дії транспортних засобів: талі, мостових кранів тощо.

Нагрівання шахтних печей проводиться з використанням рідкого та газоподібного палива або електричної енергії. Паливні шахтні печі зі звичайною повітряною атмосферою (серія ТШОВ) мають максимальну робочу температуру  $1100$  °С. В печах з використанням контрольованих атмосфер (серії ТШЗВ) встановлюється муфель з жароміцної сталі. Максимальна робоча температура цих печей становить  $900$  °С. Електричні шахтні печі з окисною атмосферою (серія СШО) мають максимальну робочу температуру  $700$  °С, а з контрольованою атмосферою (серія СШЗ) — до  $1250$  °С.

Конструкцію шахтної електричної печі серії СШЗ із контрольованою атмосферою зображено на рис. 4.7.

Піч складається зі зварного кожуха 1, футерованого всередині вогнетривким матеріалом 2. На стінах камери розміщено металеві нагрівальні елементи 3. У високотемпературних вакуумних печах та печах із нейтральними атмосферами встановлюють графітні нагрівники у вигляді стрижнів, труб, пластин тощо. Максимальна робоча температура їх становить 3000 °С. Піднімання та опускання кришки 4 виконується механізмом 5, герметизація здійснюється пісковим затвором. Контрольована атмосфера підводиться у верхню частину камери, а відведення газів проводиться через трубку в нижній частині печі.

Електричні шахтні печі типів СШО і СШЗ випускаються з такими розмірами робочого простору: діаметр 200...6000 мм, висота 300...6000 мм.

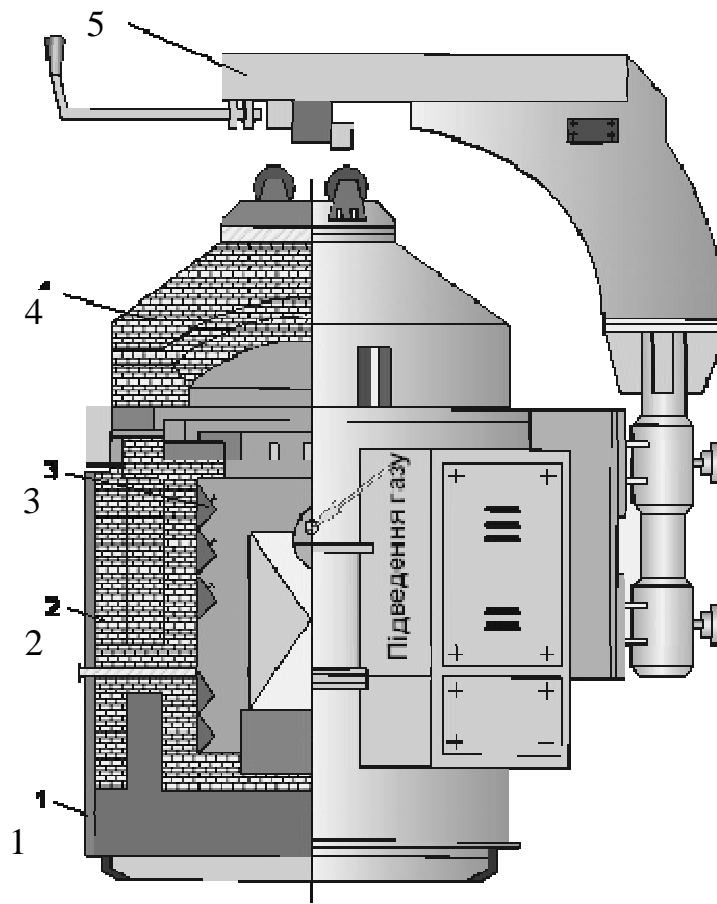


Рис. 4.7. Електрична шахтна піч серії СШЗ із контрольованою атмосферою

Для газової цементації, нітроцементації й азотування деталей застосовують електричні шахтні печі серії ІД. Процес хіміко-термічної обробки деталей здійснюється в герметичній реторті з жароміцної сталі, розміщеній в робочій камері печі. Навуглецювальна атмосфера створюється випаровуванням та розкладанням рідкого карбюратора (гасу, синтину, триетаноламіну), що подається в реторту через крапельницю в кришці печі. Відпрацьований газ відводиться через трубку і спалюється. Для створення вихрових потоків газу та вирівнювання складу газової суміші в реторті встановлено вентилятор.

Охолодження деталей після цементації здійснюється в колодязі в середовищі відпрацьованих газів. Колодязь монтують поруч із піччю. Колодязь має вигляд сталевого циліндра з подвійними стінками, між якими циркулює вода. Деталі під час охолодження не окиснюються.

Максимальна температура печей серії Ц становить 950 °С. Робочі розміри реторт: діаметр 300, 450 та 600 мм; висота 450, 600, 900 і 1200 мм. Потужність печей — 35...110 кВт.

Для газової цементації деталей з застосуванням природного газу або ендогазу з домішками вуглеводнів часто застосовують безмуфельні печі серії СШЦ. При однаковому завантаженні порівняно з печами серії Ц вони мають в 2,5...3 рази більшу продуктивність, у 2...2,5 рази менші витрати електричної енергії, в 2...3 рази скорочений цикл цементації.

Максимальна температура печей серії СШЦ становить 1050 °С. Розміри робочого простору: діаметр 300...600 мм, висота 450...1200 мм. Потужність печей — 20...110 кВт.

Електричні шахтні печі для азотування деталей мають індекс США. Азотування виконується в муфелі з жароміцної сталі. Печі бувають двох типів: *періодичної* та *напівбезперервної* дії. Останні мають два змінних муфелі. Після закінчення процесу азотування муфель з деталями виймають із печі та завантажують в охолодний колодязь, а на його місці розміщують підготовлений

для азотування муфель з деталями. Для створення циркуляції газу в муфелі встановлено вентилятор.

Електричні шахтні печі серії США випускаються на робочу температуру 650 °С з розмірами робочого простору: діаметр 200...250 мм, висота 300...3750 мм. Потужність печей становить 12...300 кВт.

Для відпуску сталі застосовують електричні шахтні печі з примусовою циркуляцією повітря серії ПН. Потужність печей становить 24...75 кВт.

У всіх типів шахтних печей температура вимірюється за допомогою термопар і регулюється автоматично. На великих печах термопари встановлюють в кількох зонах робочого простору.

Порівняно з камерними шахтні печі займають в цеху меншу площу, а на одиницю площі поду дають більшу кількість продукції.

До загальних недоліків шахтних печей слід віднести: нерівномірне нагрівання по висоті печі (особливо деталей великої довжини) та значні витрати жароміцних сталей на муфелі.

#### **4.4.3. Ковпакові та елеваторні печі**

Ковпакові печі використовують для безокисного відпалу дроту, стрічки, рулонного листа, дрібносортового прокату. Печі мають вигляд футерованого ковпака, який встановлюється на нерухомий під. Газові ковпакові печі обігріваються радіаційними трубами, а електричні — металевими нагрівниками. При застосуванні захисної атмосфери використовують муфель.

Завантаження встановлюють на стенд (під) печі і за допомогою крана накривають ковпаком, причому під ковпаком можуть бути два-три стенди, що працюють у певній послідовності. Ковпак 1 (рис. 4.8) футерований шамотною і діатомітовою цеглою.

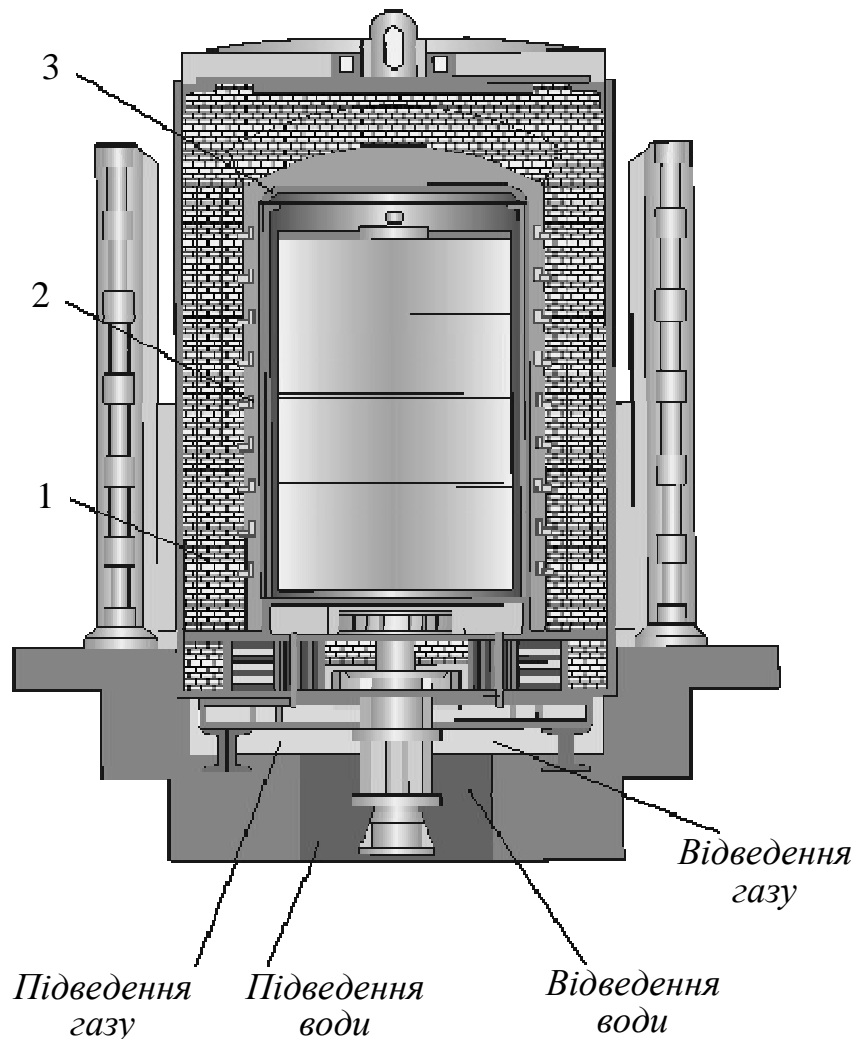


Рис. 4.8. Електрична ковпакова піч серії СГЗ із захисною атмосферою

Нагрівники підвішені на крюках 2. Муфель 3 подвійний газонепроникний, виготовлений з жароміцної сталі. Маса садки 25 т. Робоча температура 900 °С. Потужність печі 380 кВт. Витрата захисного газу 2,5 м<sup>3</sup>/год.

В елеваторних печах футеровану камеру з нагрівниками (ковпак) піднято над рівнем підлоги на колонах. Установлений на платформі футерований під з завантаженням піднімається гідравлічним або електромеханічним приводом у камеру і залишається там протягом усього циклу термообробки.

Елеваторні печі призначені для тривалого відпалу великогабаритних виливків та зварних виробів.

#### **4.4.4. Вакуумні печі**

Вакуумні печі застосовуються для безокисного нагрівання при термообробці деталей з трансформаторних й електротехнічних сталей, тугоплавких металів і сплавів. Їх виготовляють із герметичного сталевого кожуха, що охолоджується водою, в якому розташована нагрівальна камера.

Нагрівання камери здійснюється металевими (ніхромовими, вольфрамовими, молібденовими, танталовими) або графітовими нагрівниками опору. З метою виключення електричного пробоя, що легко виникає при підвищених температурах у вакуумі, всі печі працюють на зниженій напрузі. У деяких печах використовують індукційне нагрівання. Мурування печей виконується з кераміки, графіту та систем металевих екранів, які відіграють роль теплової ізоляції.

До складу вакуумної печі входять: знижувальний автотрансформатор; трансформатор для живлення допоміжних систем та механізмів печі; вакуумна система; механізми пересування садки, підняття дверцят, пересування стола гартівної ванни; водоохолодна система; щити керування й автоматичного регулювання температури і контролю якості вакууму. Вакуумна система складається з вакуумного насоса (найчастіше механічного), трубопроводів, запірної арматури. У печах з нагрівниками та екранами, виготовленими з молібдену або вольфраму, не допускається під час роботи знижувати вакуум в робочому просторі нижче  $6,6 \dots 10,2$  Па, оскільки це призводить до окиснення і виходу з ладу нагрівних елементів. Для забезпечення постійного вакууму та температури в робочому просторі вакуумні печі обладнано шлюзовими камерами, через які здійснюється завантаження і розвантаження деталей.

#### 4.4.5. Печі-ванни

У термічних цехах машинобудівних заводів для нагрівання виробів під гартування, відпуск, нормалізацію, хіміко-термічну обробку і для охолодження при ступінчастому та ізотермічному гартуванні застосовують печі-ванни. Нагрівання здійснюється рідким теплоносієм — розплавленими солями, лугами, металами (свинець, олово, їхні сплави, силумін), мінеральними мастилами.

Найбільшого поширення отримали соляні та лужні нагрівні середовища. Залежно від необхідної температури та виду обробки нагрівні середовища складаються з чистих компонентів або сумішей їх у певній пропорції.

У процесі роботи соляні та лужні розплави насичуються киснем і набувають окисної та знеуглецювальної здатності. Тому до і в процесі роботи ванни періодично розкиснюють введенням невеликих домішок ректифікаторів у розплави. Для розкиснення ванн із хлористими солями застосовують феросиліцій та буру, ванн із хлористим барієм — фтористий магній, лужних ванн — ціанисті солі. Нерозчинені окиси (шлам) виводять із ванн сітчастими черпаками.

Нагрівання в рідких середовищах має ряд переваг перед нагріванням у печах:

- більша швидкість і рівномірність нагрівання надає змогу досягти вищої продуктивності;
- висока точність регулювання температури;
- відсутність окиснення та знеуглецювання поверхні деталі;
- можливість здійснення термічної і хіміко-термічної обробки.

Основні недоліки при цьому виді нагрівання:

- необхідність періодичної заміни солей;
- мала стійкість тиглів (особливо при використанні розплавленого силуміну);
- необхідність очищення деталей від мастила, солей та лугів;

- високі вимоги до дотримання правил безпеки у зв'язку зі шкідливістю ціанистих солей, свинцю та можливими викидами рідких середовищ в атмосферу.

Піч-ванна — це шахтна піч з установленою в робочому просторі ванною або тиглем. Такі печі можуть працювати на рідкому та газоподібному паливі, або на електричній енергії. Мазутні печі-ванни і частково газові не забезпечують високої точності регулювання температури, тому їх застосування обмежене.

Залежно від температури нагрівання розрізняють *низькотемпературні* (120...700 °С), *середньо-температурні* (700...950 °С) та *високотемпературні* (1000...1300 °С) печі-ванни.

Тиглі для ванн із зовнішнім обігріванням виготовляють відлитими, штампованими або зварними з товщиною стінки 12...30 мм. Оскільки теплота передається розплаву через стінки тигля, температура нагрівального простору печі має перевищувати температуру розплаву, що збільшує небезпечність прогорання тигля. У зв'язку з цим у печах-ваннах передбачено аварійне стікання солей і рідкого металу.

Робоча температура полуменевих печей-ванн не перевищує 850 °С. Середня продуктивність залежить від розмірів тигля і може змінюватись в межах 20...125 кг/год.

Зовнішнє нагрівання тигля в електричних печах-ваннах здійснюється за допомогою спіральних і стрічкових нагрівників опору, розміщених у кілька рядів на бокових стінках мурування. Іноді для нагрівання застосовують карборундові стрижні. Електричні тигельні печі-ванни з зовнішнім обігріванням випускаються трьох типів: СВГ-1,5-2/8,5-М1, СВГ-2,5-2/8,5-М1, СВГ-3,5-4/8,5-М1 із продуктивністю відповідно 30, 80 та 130 кг/год і потужністю 10, 20 та 30 кВт.

Конструкція електричної печі-ванни серії СВГ показана на рис. 4.9.



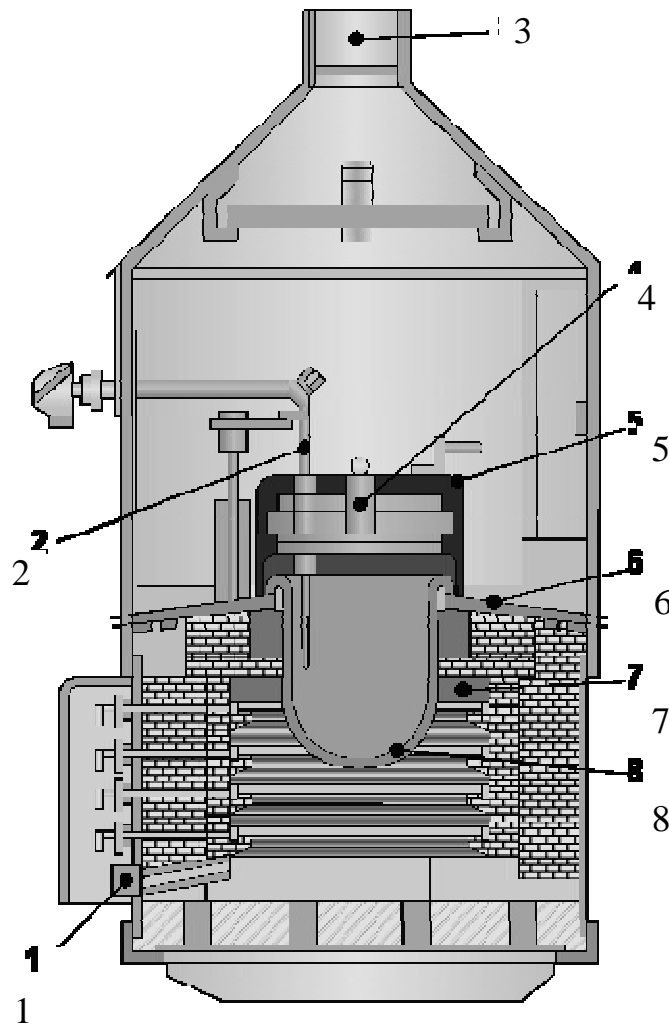


Рис. 4.9. Електрична піч-ванна серії СВГ

Піч складається з тигля 8, що утримується на чавунній плиті 6. Тигель закривається кришкою 5 з отвором 4 для закріплення деталей з пристроями й отвором для термопар 2. Робочу камеру 7 викладено шамотною цеглою. Виведення парів солі відбувається через патрубок 3. Для стікання розплавлених солей і металу передбачено отвір 1.

Залежно від способу генерації теплоти печі-ванни з внутрішнім обігріванням бувають трьох типів: з обігріванням трубчастими електронагрівниками опору, електродні й індукційні.

Печі-ванни першого типу мають трубчасті нагрівники (те-ни), розміщені безпосередньо в розплаві. Згинаючи в нагрітому

стані, їм надають зручної для використання V-подібної форми. Для прискорення нагрівання та збільшення його рівномірності ванни оснащують механічними мішалками або насосами. Максимальна робоча температура печей-ванн із трубчастими нагрівниками становить 520 °С. Печі-ванни застосовують для відпуску й охолодження при ступінчастому гартуванні інструментальних сталей, для термообробки деталей з алюмінієвих сплавів та ін.

Найпоширенішими є електродні соляні ванни. Нагрівання виробів здійснюється теплотою, що виділяється при проходженні електричного струму через розплав солі, яка чинить великий опір. Щоб уникнути електролізу солі, використовують змінний струм, знижуючи напругу з 380 або 220 до 6...30 В за допомогою трансформатора. Струм подається до електродів, розміщених у розплаві. Рівномірне нагрівання забезпечується інтенсивною циркуляцією розплавленої солі, що обумовлено взаємодією магнітних полів електродів. Електродні печі-ванни значно економні, вони дають змогу отримувати високі температури — до 1300 °С.

За конструкцією робочого простору електродні соляні ванни можна поділити на дві групи:

- печі-ванни з робочою камерою з вогнетривкого матеріалу, які використовують як високо- і середньо-температурні;
- печі-ванни з металевим тиглем, які застосовують як низько-температурні та рідше середньо-температурні.

Електроди для низькотемпературних ванн виготовляють із сталей марок 10, 15 або 20, для середньо- і високотемпературних — із жароміцних сплавів 12Х17, 15Х28, 12Х18Н9Т та ін.

На практиці добре зарекомендували себе трифазні соляні ванни серій С і СВС. На рис. 4.10 показано конструкцію трифазної печі-ванни серії СВС.

Ванну 7 прямокутної форми викладено шамотною цеглою в проміжному кожусі-тиглі 8, разом з яким вона може легко вийматися з печі та замінюватися новою. Вподовж одного з боків ванни розміщено три сталевих електроди 2, до яких через шинопровід 6

підведена напруга від вторинних обмоток понижуючого трансформатора. Для захисту електродів від можливого короткого замикання через деталь, що нагрівається у ванні, встановлена металева перегородка 1. Температуру ванни вимірюють радіаційним пірометром 5. Пори солі виводять у витяжну систему через ковпак 4. Для захисту працюючих від бризок розплавленої солі завантажувальний отвір у ковпаку закрито ланцюговою завісою 3.

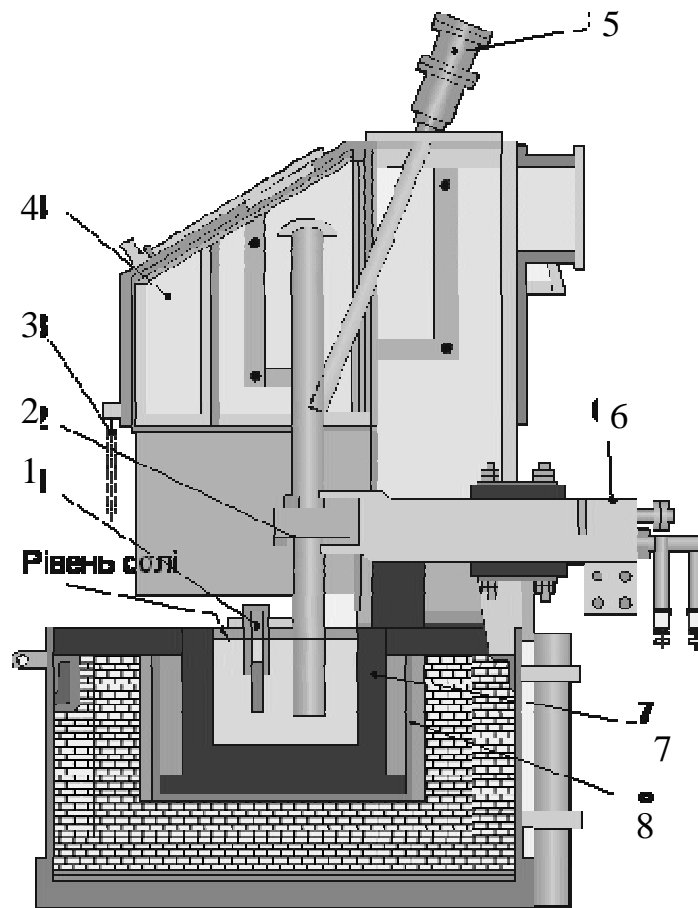


Рис. 4.10. Трифазна електродна піч-ванна серії СВС

Промисловість випускає електродні печі-ванни серії СВС потужністю 20, 35, 60 та 100 кВт з розмірами робочого простору до 350×800×400 мм і продуктивністю до 270 кг/год.

Печі-ванни серії С виготовляють серійно потужністю 20...160 кВт. Температуру печей-ванн до 1300 °С вимірюють ра-

діаційними пірометрами, а для вимірювання температур до 1000 °С використовують термопари.

Електродні соляні ванни застосовують:

- до 650 °С — для низькотемпературного відпуску сталі, відпалу і нагрівання під гартування алюмінієвих сплавів, для низькотемпературного ціанування, азотування, першого ступеня нагрівання під гартування та ступінчастого гартування швидкорізальної сталі;
- до 850 °С — для нагрівання під гартування вуглецевої сталі, середньо-температурного ціанування, відпалу сталі, а також кольорових металів, для другого ступеня нагрівання під гартування швидкорізальної сталі;
- до 1000 °С — для нагрівання під гартування вуглецевої і низьколегованої сталей та для термообробки чавунних виливків;
- до 1300 °С — для нагрівання під гартування швидкорізальної сталі, відпалу нержавіючих сталей тощо.

Для термообробки деталей великої довжини використовують нестандартні глибокі соляні ванни. Рівномірність температури в таких ваннах забезпечується встановленням кількох пар електродів по всій глибині робочого простору. Пуск у роботу електродних печей-ванн досить складний, тому їх практично не вимикають. Під час пуску сіль засипають на дно печі-ванни невеликим шаром і розплавляють її теплотою дуги, що виникає між кінцем додаткового та одного з основних електродів. Після цього додатковий електрод виймають, а в піч-ванну обережно невеликими порціями додають нову сіль. Тривалість пуску становить 2...4 год.

Іноді для пуску застосовують спеціальний пристрій у вигляді стояка з ніхромовим нагрівником, який знаходиться в затвердлій солі. При пропусканні струму від трансформатора пристрій нагрівається та розплавляє сіль.

Для подолання труднощів пуску розроблено принципово новий вид соляних ванн — індукційні високо- і середньо-

температурні ванни з графітовими нагрівниками. Схему такої ванни зображено на рис. 4.11.

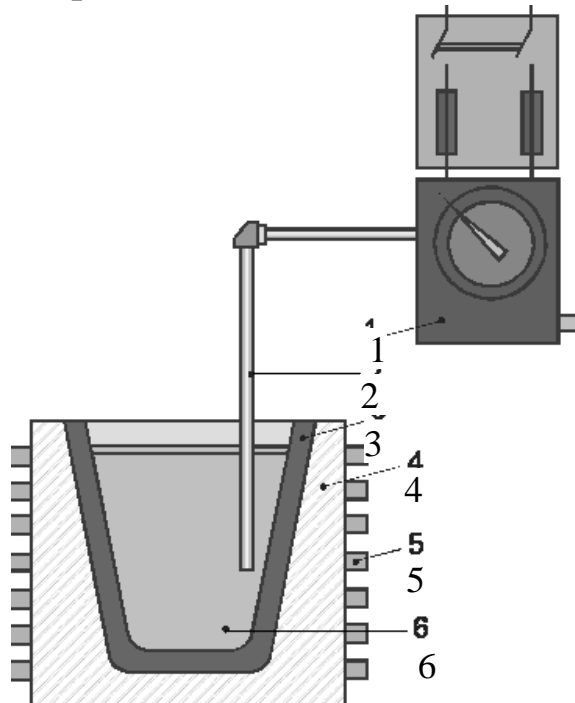


Рис. 4.11. Схема індукційної соляної ванни

Стандартний графітовий тигель 3 встановлюється у вогнетривкій набивці 4 у високочастотне електромагнітне поле, яке створює індуктор 5. Останній живиться від установки, що виробляє СВЧ. Під дією індуктивного струму графітовий тигель, який має високий електричний опір, інтенсивно розігрівається і сіль 6, що знаходиться в ньому, розплавляється, нагріваючи деталі. Температура солі регулюється за допомогою автоматичного потенціометра 1 із термопарою 2. Для нагрівання під гартування інструментів невеликого розміру використовують графітові тиглі завглибшки 275 мм діаметром 200 мм та завтовшки 18 мм.

Під час експлуатації соляних ванн необхідно дотримуватись ряду правил. При потраплянні в сольовий розплав навіть незначної кількості вологи відбувається викид солі з ванни. Тому перед завантаженням у ванну сіль подрібнюють і ретельно просушують. Сушінню піддають також деталі, що будуть оброблятися.

Потрапляння ціанистих солей в селітрову ванну може спричинити викид та вибух.

Для низького відпуску, штучного старіння й охолодження деталі при ступінчастому, а також ізотермічному гартуванні застосовують мастильні ванни.

Електричні мастильні ванни зі сталевим тиглем та ізольованими нагрівниками мають індекс СВМ. Для виведення парів мастила у ваннах передбачено бортові відсмоктувачі. Великі ванни обладнано мішалками для механічного перемішування мастила. В середовище деталі завантажують у сітчастих кошиках.

Мастильні ванни з тиглем прямокутного перерізу випускають з розмірами робочого простору: завширшки і завдовжки 5, 8 та 10 дм, заввишки 5 і 10 дм. Потужність їх становить 15...40 кВт.

#### **4.5. Механізовані печі та агрегатне термічне обладнання безперервної дії**

Сучасний стан термічних цехів характеризується високим рівнем механізації й автоматизації більшості операцій термічної і хіміко-термічної обробки. Найпростіша механізація термічних печей полягає у використанні підйомного обладнання, завантажувальних машин та ін. У складніших варіантах механізація охоплює переміщення деталей в робочому просторі печі, завантаження і розвантаження деталей, передачу їх на наступні операції тощо.

Механізація технологічних процесів у термічних цехах здійснюється як удосконаленням конструкцій печей, так і оснащенням виробництва механізованим пічним обладнанням.

На рис. 4.12 показано конструкцію механізованої камерної печі з ланцюговим механізмом для переміщення поду.

Піч має нагрівальну камеру 4 та завантажувальний тамбур (шлюз) 2 з гартівним баком 1. Піддон із деталями спочатку пода-

ється в завантажувальний тамбур, а потім за допомогою ланцюгового механізму 5 переміщується в нагрівальну камеру. Після нагрівання піддон повертається в завантажувальний тамбур й опускається в бак з мастилом. Після гартування деталей тамбур розвантажують і знову завантажують наступний піддон.

Піч обігрівается радіаційними трубами, в яких спалюється газ. Усі елементи печі виконано в єдиному каркасі, що забезпечує її герметичність. Для кращої циркуляції газу в робочій камері піч має вентилятор 3.

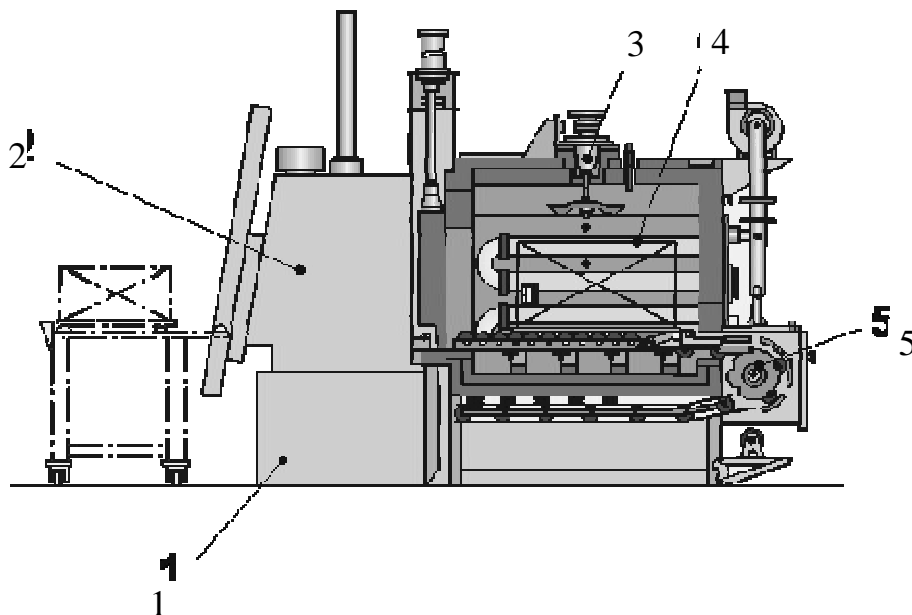


Рис. 4.12. Механізована камерна піч з ланцюговим механізмом для переміщення поду

Гартівний бак ізольовано від контакту з повітрям й оснащено автоматичним обладнанням для підтримки сталої температури середовища.

Піч такої конструкції може бути використана для світлого гартування, газової цементації та нітроцементації деталей.

Промисловість серійно випускає механізовані електричні камерні печі. Вони мають індекс СНЗА з максимальною температурою до 1000 °С. Розміри робочого простору цих печей такі: ширина 300...850 мм, довжина 650...2200 мм, висота 200...500 мм.

У цехах масового і багатосерійного виробництва широко застосовують механізовані печі *циклічної та безперервної дії*.

Для термообробки дрібних деталей, що мають круглу, без гострих кромek форму (ролики, кульки, дрібні кільця тощо) часто використовують барабанні печі. Газові барабанні печі мають індекс ТБЗН (із захисною атмосферою безперервної дії) і ТБЗП (періодичної дії).

Електричні барабанні печі позначають СБЦ (із цементаційною атмосферою), СБЗ (із захисною атмосферою), СБО (для низького відпуску).

На рис. 4.13 зображено електричну барабанну піч серії СБЗ.

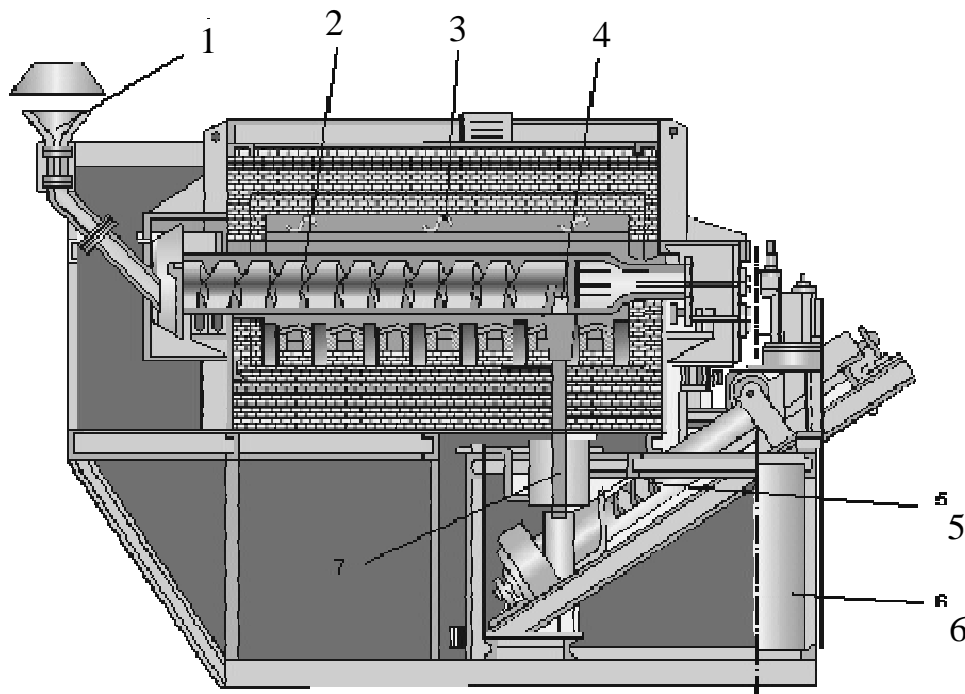


Рис. 4.13. Електрична барабанна піч серії СБЗ

У барабанних печах обробляють деталі масою до 0,3 кг. Продуктивність печей серій СБЗ та СБО становить 15...240 кг/год, СБЦ — 5...8 кг/год.

В масовому виробництві для нагрівання однотипових деталей застосовують карусельні печі з обертовим подом. Карусельні



печі можуть працювати на газі (серія ТАКЗ) або на електричній енергії (серія САЗ).

Схема, що пояснює роботу печі з крокуючим подом, зображена на рис. 4.14. У поздовжніх щілинах поду печі встановлюються рухомі балки, які можуть робити поступальні та зворотні рухи по колу (А), еліпсу (Б) або прямокутнику (В). Рухи здійснюється від важільного або ексцентрикового механізму, розміщеного під подом.

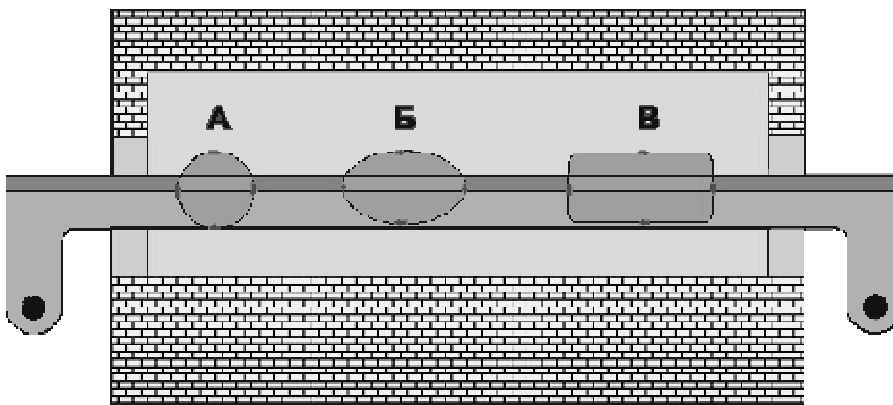


Рис 4.14. Схема процесу роботи печі з крокуючим подом

Через певні проміжки часу балки трохи піднімають завантаження над подом, переносять його вперед у бік розвантажувального вікна на певну відстань (крок балки), потім опускають завантаження на під і повертаються назад у вихідне положення. В печах з крокуючим подом можна використовувати контрольовані атмосфери.

Конструкцію електричної карусельної печі САЗ-11.5.3/10 показано на рис. 4.15.

Продуктивність печей з крокуючим подом — від 150 кг до 2...4 т/год, швидкість пересування деталей в печі — 1...7 м/хв, робоча температура — 950 °С, потужність — 330...630 кВт.

Для нагрівання під гартування дрібних деталей (шпильок, болтів, кульок, підшипникових кілець та ін.) застосовують печі з пульсуючим подом. Пульсуючий під, що має форму лотка і вста-

новлений на котках у робочій камері печі, дістає періодичний зворотно-поступальний рух. У кінці кожного робочого ходу лоток, дійшовши до упору, різко (з ударом) зупиняється, а деталі, які знаходяться на ньому, за інерцією переміщуються вперед на невелику відстань.

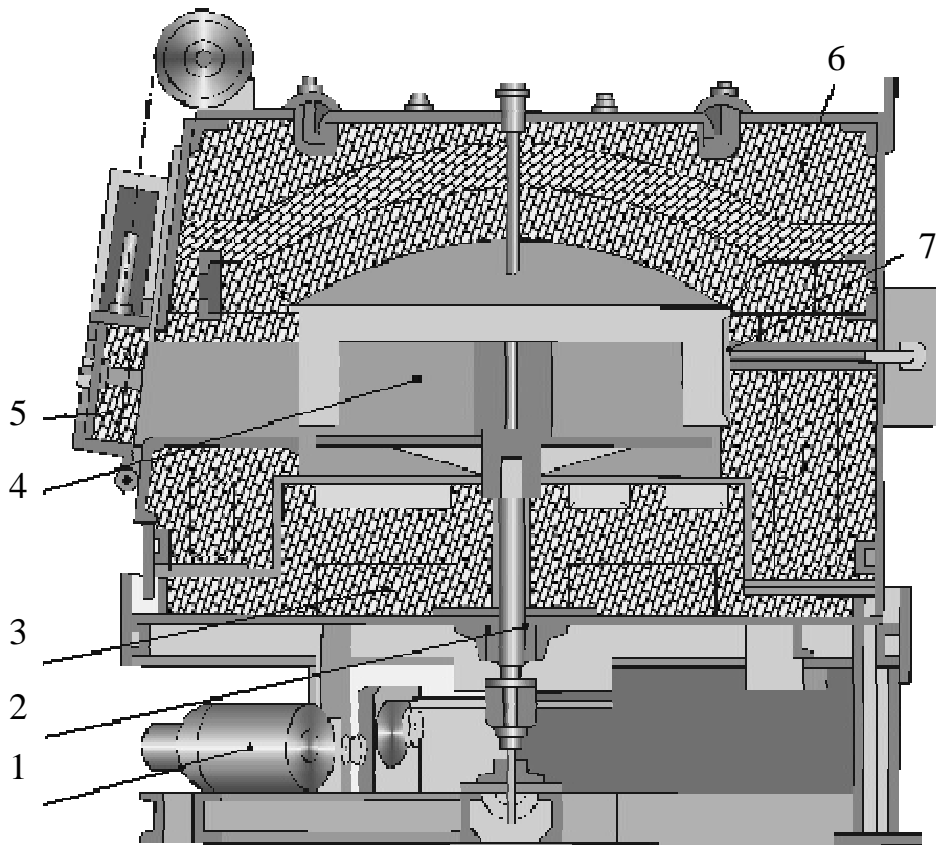


Рис. 4.15. Конструкція електричної карусельної печі САЗ-11.5.3/10

Привід руху лотка має варіаторний механізм, що дає змогу змінювати тривалість руху лотка.

Електричні печі з пульсуючим подом мають індекс СИЗ. Потужність печей — 12...160 кВт, продуктивність — 20...250 кг/год, максимальна робоча температура — 900 °С.

Агрегатне обладнання й обладнання потокових автоматичних ліній комплектуються з печей і установок безперервної дії. Для цього застосовують печі з крокуючим або пульсуючим подом, штовхальні, конвеєрні та ін. Крім того, до складу агрегатів і

потокових ліній входять елементи, що забезпечують виконання всього комплексу операцій термообробки.

Печі безперервної дії за конструкцією є прохідними. З боку завантаження установлюються попередні камери (тамбури), а з боку розвантаження — гідравлічні затвори або перепускні камери для перепуску деталей та піддонів. Завантаження і розвантаження деталей механізовано. Для забезпечення циркуляції гарячого повітря або контрольованої атмосфери в печах установлюють вентилятори.

Печі безперервної дії виконують багатозоновими. Кожна зона має комплект нагрівальних елементів, потужність яких регулюється окремо. Печі безперервної дії продуктивніші та мають менші питомі витрати енергії порівняно з іншими видами пічного обладнання.

У штовхальних печах вироби проштовхуються від завантажувального вікна до вивантаження по направляючих поду (рейках, роликах, брусках) штовхачем, установленим перед вікном завантаження. Штовхач має електромеханічний або гідравлічний привід. Важкі вироби правильної прямокутної форми переміщуються в печі безпосередньо, а дрібні — завантаженими в піддони.

Різновидом штовхальних є рівчаків печі, в яких пересування порівняно невеликих деталей правильної форми (наприклад, кілець підшипників кочення) здійснюється штовхачем по лотках — рівчаків із жароміцної сталі. Таких рівчаків за шириною робочої камери може бути кілька. Полуменеві штовхальні печі з окисною атмосферою мають індекс ТТО, а з контрольованою атмосферою — ТТЗ. Гранична робоча температура в печах ТТО становить 1150 °С, а в печах ТТЗ — 950 °С.

Продуктивність печей при гартуванні, відпалі, нормалізації — 170...4350 кг/год, при відпуску та нітроцементациї — 130...4800 кг/год, при цементациї — 60...2400 кг/год.

Електричні штовхальні печі з окисною атмосферою мають індекс СТО, з контрольованою атмосферою — СТЗ, для цементациї

ції — СТЦ. Максимальна робоча температура печей СТО становить 750 °С, СТЗ — 1000 °С, СТЦ — 1100 °С; максимальна продуктивність — у межах 200...1800 кг/год, а потужність — у межах 35...580 кВт.

Переміщення деталей в конвеєрних печах здійснюється на конвеєрній стрічці, яка залежно від розмірів, маси деталей, що нагріваються, та температурного режиму може мати різну конструкцію: у вигляді ланцюгів (ланцюговий конвеєр), штампованих або литих ланок (панцерний конвеєр), металевої сітки (сітковий конвеєр) і пластинчасто-стрижневої конструкції. Конвеєрні стрічки виготовляють із жароміцної сталі.

Конвеєрну стрічку встановлюють на барабани, один з яких — ведучий. Барабан отримує рух обертання від двигуна постійного струму. Натяг конвеєрної стрічки здійснюється натяжною станцією (з використанням пружин або важелів) завдяки зміні відстані між осями барабанів.

Для термообробки дрібних деталей застосовують підвісний конвеєр. Деталі або кошики з ними підвішують на鉤ках у ланцюзі конвеєра, траса якого проходить через камери і робочий простір печі.

Електричні конвеєрні гартівні печі позначаються індексом СКЗ, відпуску — СКО. Електричні конвеєрні гартівні печі випускають потужністю 30...850 кВт на робочу температуру до 900 °С, а відпуску — 15...700 кВт на робочу температуру до 700 °С. В гартівних та високотемпературних відпускних печах використовується захисна атмосфера. Продуктивність печей становить 50...3600 кг/год.

У рольгангових печах переміщення деталей здійснюється на обертових жароміцних роликах, розміщених на поду печі. Кожен ролик виходить за межі мурування і утримується підшипниками. Обертання роликів забезпечується приводом від електродвигуна постійного або змінного струму.

Рольгангові печі забезпечують високу продуктивність при незначній висоті садки та швидку передачу нагрітих деталей без остигання в гартівний бак. Печі виготовляють із полуменевим й електричним нагріванням для роботи з окисною (індекси ТРО і СРО) або з контрольованою атмосферою (індекси ТРЗ та СРЗ). Максимальна температура нагрівання в печах ТРО становить 1000 °С, в печах ТРЗ — 950 °С, в печах СРО — 350 °С і СРЗ — 1200 °С.

У термічних цехах масового та багатосерійного виробництва обладнання (печі, гартівні баки, мийні машини тощо) встановлюються в порядку послідовності виконання операцій і утворюють агрегат для термічної або хіміко-термічної обробки. Існує кілька технологічних схем компоновання агрегатів:

- М-01 — нагрівання для гартування в мастилi, промивання, високий або низький відпуск деталей;
- М-02 — той самий цикл, але без промивання деталей (гартування у воді);
- М-03 — той самий цикл, що й М-01, лише замість гартівного мастильного бака встановлюється водяний.

Конвеєрні гартівно-відпускні агрегати укомплектовано гартівними конвеєрними електричними печами типу СКЗ, гартівними баками, мийними машинами, відпускними конвеєрними електричними печами типу СКЗ (для високого відпуску) або СКО (для низького відпуску) та баками для охолодження деталей після відпуску. Агрегати позначаються індексами СКЗА і цифрами. Цифра в чисельнику позначає порядковий номер агрегату, а в знаменнику — температуру відпускної печі.

Аналогічно комплектуються штовхальні гартівно-відпускні агрегати (індекс СТЗА), штовхальні агрегати для цементації та нітроцементації деталей (індекс СТЦА).

Для термообробки інструментів використовують агрегати, укомплектовані печами-ваннами.

На рис. 4.16 показано схему напівавтоматичного гартівного агрегату ТА-22, призначеного для гартування інструментів великих та середніх розмірів зі швидкорізальної сталі.

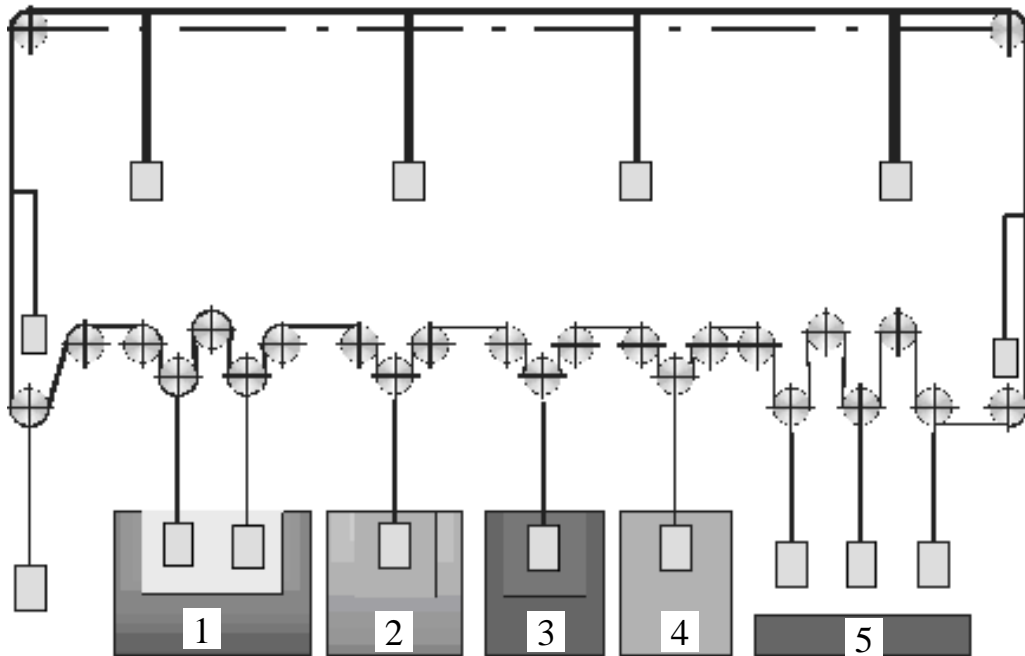


Рис. 4.16. Схема напівавтоматичного гартівного агрегату ТА-22

До складу агрегату входять: шахтна піч 1 для першого підігрівання інструментів з електричним або газовим нагріванням до температури 300...500 °С; соляна електродна ванна 2 для другого підігрівання до 850...880 °С; соляна електродна ванна 3 для остаточного нагрівання до 1200...1300 °С; соляна ванна 4 з температурою 400...550 або 600...675 °С для ступінчастого охолодження інструментів; камера остигання 5, в якій інструменти охолоджуються струменем повітря.

Після остаточного охолодження інструменти з пристроями розвантажуються в місці завантаження. Довжина гартівного агрегату становить 9 м, ширина і висота — 4,5 м. Найчастіше обладнання в агрегатах і лініях розміщають прямолінійно. При обмеженні виробничих площ приймають П-подібне розташування обладнання.

Для транспортування деталей з однієї ванни в іншу застосовують важільні перекидачі, ланцюгові конвеєри й автооператори. Важільні перекидачі не завжди забезпечують надійне і правильне встановлення підвісів з інструментами, а ланцюгові конвеєри часто виходять з ладу через послаблення натягу ланцюга.

Найдосконалішими та надійними є автооператори. *Автооператор* — це візок із штангою та траверсою з двома електричними приводами горизонтального і вертикального переміщень. Візок може здійснювати горизонтальні рухи по рейках, а також піднімати й опускати штангу з траверсою, на якій закріплено пристрої з інструментами. Автооператори оснащено блоками програмного керування.

#### **4.6. Обладнання для поверхневого нагрівання деталей**

Для поверхневої термічної та хіміко-термічної обробки деталей застосовують обладнання з нагріванням СВЧ, газополум'яним нагріванням, нагріванням в електроліті тощо. Обладнання виготовляється у вигляді *універсальних верстатів* й *установок* (для обробки різноманітних деталей), *спеціальних верстатів* (для обробки однотипових деталей різного розміру) і *спеціалізованих верстатів* (для обробки деталей одного типорозміру).

Універсальні верстати й установки мають пристрої для закріплення, переміщення деталі в процесі нагрівання та охолодження, а також засоби для зміни параметрів електричного режиму. Спеціальні та спеціалізовані верстати обладнані комплексом пристроїв для завантаження, переміщення і вивантаження деталей певного типу. Весь технологічний процес термообробки на таких верстатах автоматизовано, а режимні параметри підтримуються постійними за допомогою регуляторів. Спеціальні та спеціалізовані верстати мають високу продуктивність і застосовуються у потокових лініях багатосерійного і масового виробництва деталей.

На рис. 4.17 зображено схему універсального агрегатного верстата для гартування деталей типу тіл обертання після індукційного нагрівання.

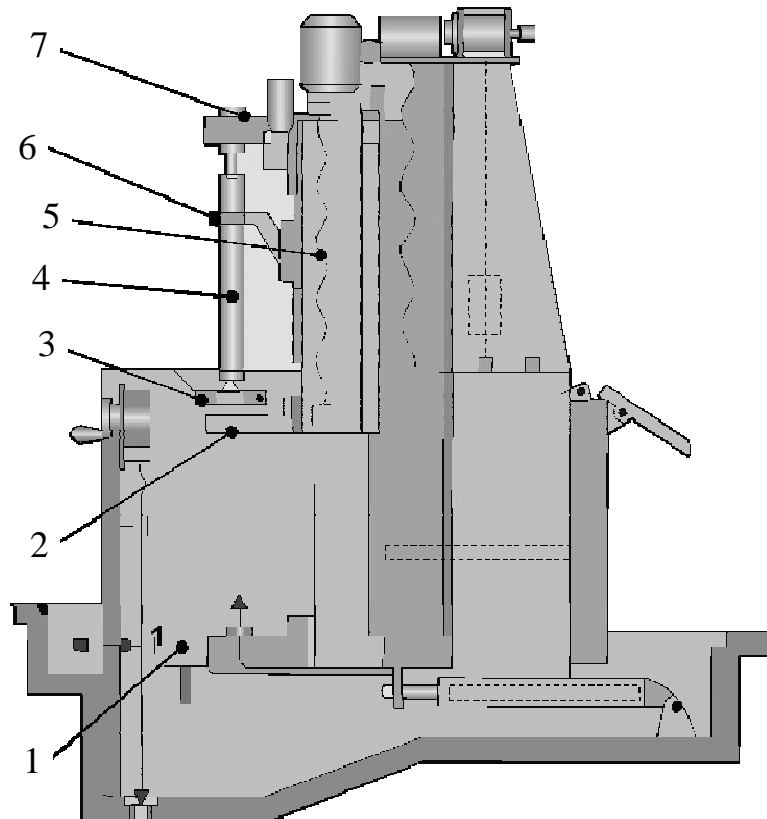


Рис. 4.17. Схема універсального агрегатного верстата для гартування деталей типу тіл обертання

Деталь 4 типу вала закріплюють у центрах 2, 7 і гартують, переміщаючи знизу вгору за допомогою гвинтового приводу 5 в нерухомому індукторі 3. В процесі гартування деталь обертають за допомогою центра 2.

Охолоджують деталь водою або емульсією за допомогою спреєра, з'єданого з індуктором. Для встановлення та зняття деталі центр 7 виготовлено обертовим. У момент установа вал утримується роз'ємним люнетом 6. Зубчасті колеса для гартування встановлюють на спеціальну оправку. У процесі нагрівання оправка разом із зубчастим колесом обертається, а після закінчення нагрівання її опускають в гартівний бак 1.



Серійно випускаються універсальні напівавтоматичні верстати КУ-190, КУ-198 та інші, які застосовуються для безперервно-послідовного гартування деталей типу тіл обертання діаметром 300...400 мм, завдовжки до 5000 мм масою до 10 т.

Для живлення індукторів верстатів використовують індукційні установки з електромагнітними або тиристорними перетворювачами частоти та ламповими генераторами.

Принципову схему індукційної установки з електромашинним перетворювачем частоти показано на рис. 4.18.

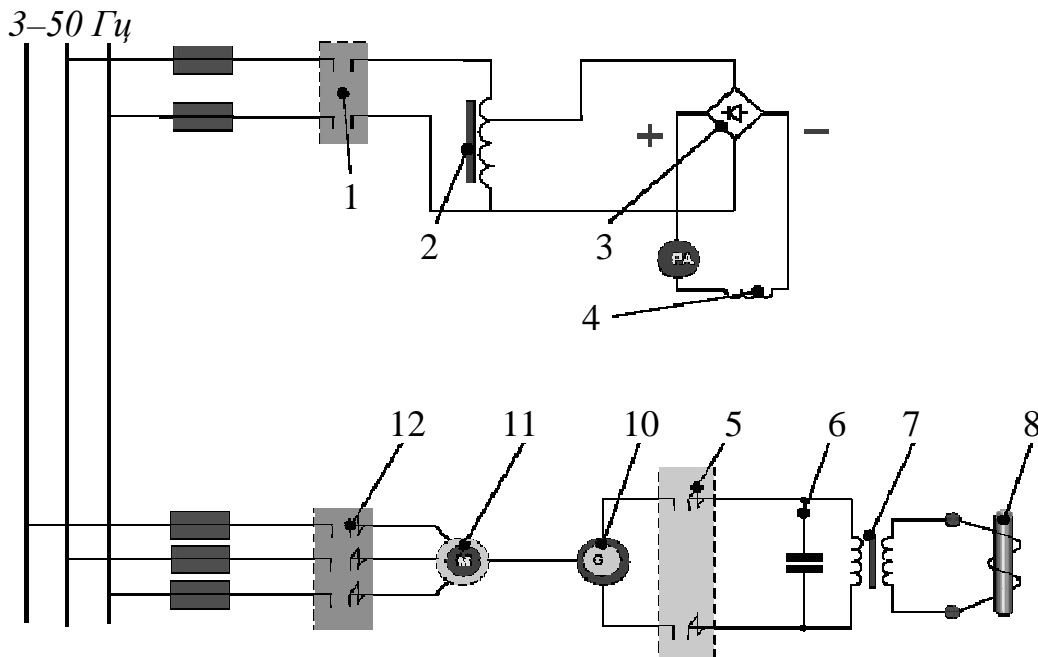


Рис. 4.18. Принципова схема індукційної установки з електромашинним перетворювачем частоти

Установка живиться від трифазної мережі змінного струму частотою 50 Гц і напругою 380 В. Основним елементом установки є генератор СВЧ 10 із приводним електродвигуном 11. Обмотка збудження 4 генератора живиться від випрямляча 3, вхідна напруга якого регулюється автотрансформатором 2. Напруга високої частоти, що знімається з генератора, через компенсвальну батарею 6 подається на знижувальний гартівний трансформатор 7, до вторинної обмотки якого приєднано індуктор 9 із деталлю 8. Пуск установки здійснюється магнітними пускачами 1, 5 та 12.

Для оснащення гартівних верстатів з індукційним нагріванням серійно випускаються індукційні установки ИЗ1-30/8, ИЗ1-100/2,4, ИЗ2-100/8, ИЗ1-100/2,3, ИЗ2-200/8 з одним або двома електромашинними перетворювачами частоти. Літери і цифри в індексі установки позначають: И — індукційна; З — гартівна; цифра після ИЗ — модифікація; цифри після дефіса — потужність середньої частоти, кВт; цифра в знаменнику — робоча частота, кГц.

Тиристорні перетворювачі частоти перетворюють частоту 50 Гц на 150...8000 Гц. Схема тиристорного перетворювача частоти включає випрямляч, блок дроселів, тиристорний перетворювач (інвертор), ланки контролю та ряд допоміжних вузлів. Для індукційного нагрівання на високих частотах (50...5000 кГц) застосовують високочастотні установки із ламповими генераторами. Літери та цифри в індексі установки позначають: ВПЧ — вертикальний перетворювач частоти; ВЧ — високочастотна; И — індукційна; Г — генератор; цифра після літер — модифікація; цифра після дефіса — коливальна потужність, кВт; цифра в знаменнику — робоча частота, МГц.

Основними елементами лампових генераторів (рис. 4.19) є: трифазний силовий трансформатор 1, що підвищує напругу з 220...380 до 6000...9000 В.

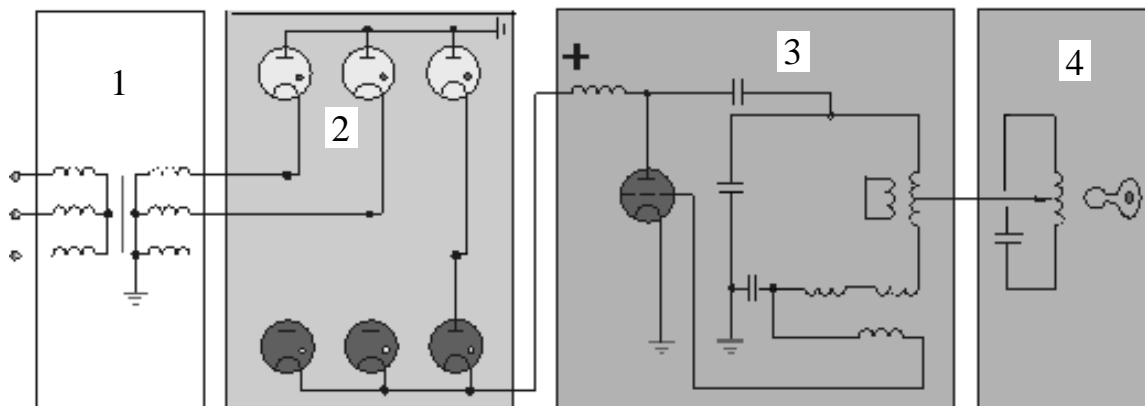


Рис 4.19. Схема лампового генератора з частотою 60 кГц

Випрямний блок 2 на газових тиратронах призначений для перетворення змінного струму на постійний напругою до 9000... 15000 В. Генераторний блок 3 з однією або кількома генераторними лампами перетворює постійний струм на змінний високої частоти. Коливальний контур 4 складається з повітряного знижувального трансформатора з індуктором і конденсаторної батареї.

Деякі елементи високочастотних установок (перетворювачі, генераторні лампи, індуктори та ін.) охолоджуються водою.

Установки мають блокове виконання (у вигляді шафи). Корпуси всіх блоків повинні мати надійне заземлення і механічне електроблокування дверцят, щоб уникнути ураження персоналу напругою при експлуатації установки.

Верстати живляться або централізовано від високочастотних установок, розміщених в окремих приміщеннях, або від індивідуальної установки. Компенсувальні конденсаторні батареї та навантажувальні блоки, щоб уникнути втрати енергії в струмопровідниках, установлюють у самому верстаті або поруч.

Верстати для поверхневого полуменевого гартування деталей оснащуються пальниками із змінними наконечниками. На мундштукові кожного наконечника є два ряди сопел. У верхній ряд сопел подається горюча суміш, а в нижній — вода. Гартування поверхневого шару деталі здійснюється при переміщенні гартівної головки, на якій встановлено пальник.

Установки для нагрівання деталей в електроліті складаються з джерела постійного струму (генератора або напівпровідниково-го перетворювача) і технологічного агрегату, до складу якого входять нагрівальна ванна, система циркуляції та охолодження електроліту, механізми і пристрої для завантаження, закріплення та вивантаження деталей. Установки працюють в автоматичному режимі.

Для поверхневого нагрівання деталей при термообробці застосовують лазерне випромінювання. Для цієї мети використовують лазерні технологічні установки широкого призначення з

газовими лазерами на азоті або вуглекислоті. Такі лазери можуть працювати в безперервному режимі при досить високій потужності (до 10...12 кВт). В установці передбачено систему сканування, яка забезпечує кероване переміщення лазерного променя з великою швидкістю. Сканувальний лазерний промінь за дуже короткий проміжок часу зумовлює нагрівання лише в тонкому поверхневому шарі деталі. Гартування цього шару забезпечується швидким відведенням теплоти в глибину холодного металу.

#### 4.7. Обладнання для охолодження деталей

Охолодні рідини (вода, водяні розчини солей, лугів і мастило) знаходяться в гартівних баках. У термічних цехах застосовують кілька видів гартівних баків: *немеханізовані* (для використання в одиничному та малосерійному виробництві) і *механізовані безконвеєрні* (для використання в багатосерійному та масовому виробництвах, а також для оснащення агрегатного пічного обладнання і потокових ліній).

Немеханізовані гартівні баки — це коробчасті зварні посудини, виготовлені з листової сталі. Об'єм баків визначається розмірами деталей, що гартуються. Для визначення об'єму рідини використовують таке співвідношення: 10...20 л рідини на 1 кг деталей, що гартуються протягом 1 год, при температурі гартування 800...1000 °С. При недостатній кількості рідини можливим є її перегрівання, що призводить до зміни охолодної здатності охолодника і появи браку.

Баки бувають *стаціонарними*, які встановлюють на підлозі або в заглиблення підлоги, та *пересувними* — на візках. Часто застосовують здвоєні баки з перегородкою для води і мастила.

Немеханізовані баки для гартування дрібних заготовок можуть не мати системи охолодження гартівного середовища. У баках з охолодженням гартівної рідини встановлюють змійовики

для циркуляції холодної води або здійснюють циркуляцію рідини через мастильноохолодник. Для охолодження заготовок та вирівнювання температури гартівного середовища по об'єму бака використовують подачу мастила під тиском по замкнутій системі трубопроводів, перемішування рідини за допомогою крильчаток.

У сучасних конструкціях баків передбачено пристрої для відсмоктування парів й отвір для зливання мастила при їх переповненні.

Агрегати зі штовхальними печами оснащені механізованими безконвеєрними баками. В бакові встановлено стіл з отворами в кришці. За допомогою пневматичного пристрою бак може підніматися, опускатися і коливатися. Деталі або піддони встановлюють розвантажувальними засобами на стіл, який знаходиться у верхньому положенні. Потім стіл опускають в мастило та коливають. Після охолодження деталей стіл піднімають, а деталі передають на наступну операцію. Продуктивність механізованого бака становить до 300 кг/год.

Широке застосування знаходять баки з поворотним і опускним столом, двома столами та ін.

Для зменшення деформації у процесі гартування таких деталей, як зубчасті колеса, зірочки, кільця тощо, застосовують пневматичні та гідравлічні гартівні преси і машини, в яких деталі затискають між штампами, плитами чи роликами. У такому положенні вони або опускаються в гартівне середовище, або охолодна рідина подається спреєрним пристроєм чи спеціальними каналами штампа. В останньому випадку швидкість охолодження деталей можна регулювати, змінюючи тиск охолодної рідини.

Для гартування осьових деталей (кулачкових валів, півосей та ін.) використовують гартівні машини, в яких закріплена деталь обертається в гартівній рідині.

#### 4.8. Установки для обробки сталі холодом

Понижені температури для обробки сталі холодом створюють в основному двома методами: в охолодних сумішах або в холодильних установках. Охолодні суміші застосовують в одиничному та малосерійному виробництвах, а в багатосерійному і масовому виробництвах використовують холодильні установки.

Найпростіший спосіб створення низької температури — застосування суміші ацетону або бензину з сухим льодом (твердою вуглекислою). Зниження температури суміші відбувається внаслідок відбирання теплоти, що витрачається на плавлення вуглекислоти. Коли тверді частинки вуглекислоти при доданні в суміш перестають інтенсивно плавитися та вільно плавають на поверхні, температура суміші сягає  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Деталі охолоджують безпосередньо в суміші або в посудині, яка нею охолоджується. Витрата сухого льоду становлять приблизно 800 г на 1 л суміші.

Для поглибленого охолодження деталей використовують зрідженні гази: повітря, кисень, азот. Зрідженні гази дають змогу створити температуру від  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для створення низьких температур у холодильних установках застосовують рідини, які називаються *холодоагентами*. До особливих властивостей цих рідин належать їхня здатність переходити в пароподібний стан при низьких температурах з великою теплотою пароутворення, а також здатність легко конденсуватися (згущуватися при стисненні).

Холодоагентами найчастіше використовують фреони — похідні метану й етану, в яких водень частково або повністю замінено хлором і фтором. Залежно від марки рідини температура кипіння знаходиться у межах  $-30\text{...}-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Крім фреону, застосовують аміак (температура кипіння  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), етилен (температура кипіння  $-133\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та ін. Поставляють холодоагенти в зрідженому стані в балонах.

Холодильна установка складається з бака для зберігання в зрідженому стані газу, холодильного агрегату з охолодною робочою камерою і приладів управління. Основним елементом холодильної установки є холодильний агрегат.

Схему холодильного агрегату з одним циклом роботи зображено на рис. 4.20, а.

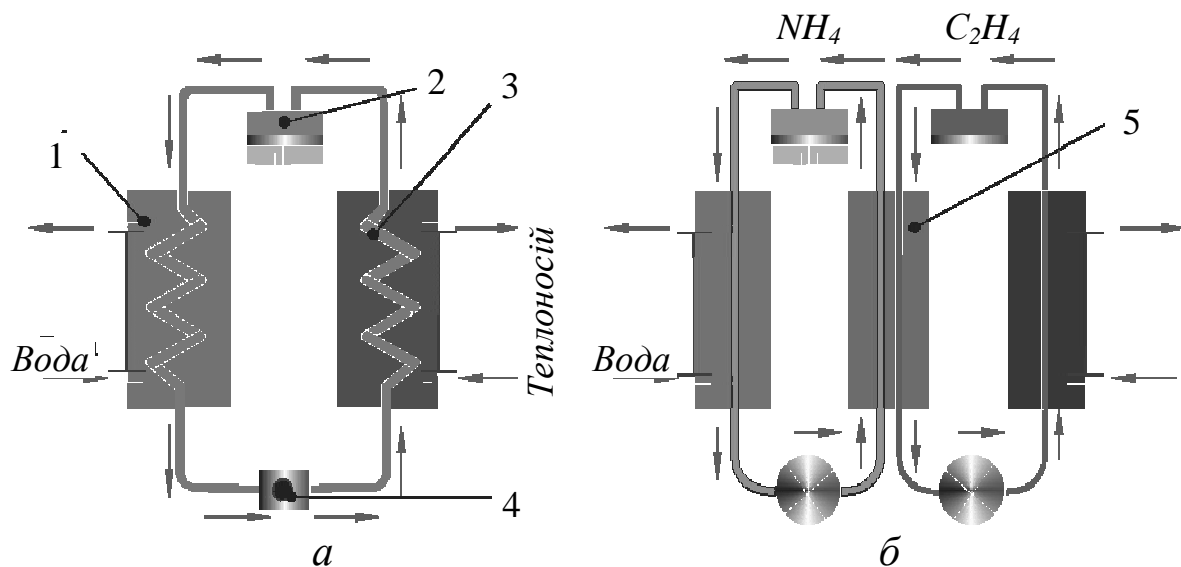


Рис. 4.20. Принцип дії холодильних агрегатів

Пари холодоагенту з випарника 2 відсмоктуються та стискуються компресором 1. При стисненні температура їх підвищується. В конденсаторі 3 нагріті пари холодоагенту охолоджуються водою або іншою рідиною і конденсуються. Рідкий холодоагент, пройшовши через дросельну трубку 4, подається у випарник 2, де розширюється та перетворюється на пару. При випаровуванні холодоагенту відбувається поглинання теплоти з робочого простору холодильної камери, і температура в камері знижується.

Для створення знижених температур використовують холодильні агрегати з каскадним циклом, які можуть працювати на кількох холодоагентах. Схему двокаскадного холодильного агрегату показано на рис. 4.20, б. В таких агрегатах випаровування одного холодоагенту ( $\text{NH}_4$ ) в камері 5 зумовлює конденсацію іншого холодоагенту ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) з нижчою температурою. Залежно від

необхідної температури застосовують холодильні агрегати з двома та більше циклами роботи.

Промисловість випускає холодильні установки у вигляді термокамер (ТК) або термобарокамер (ТБК) в комплекті з холодильною машиною і приладами автоматичного регулювання. Холодильні установки можуть створити температуру до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За допомогою вмонтованих електронагрівників в установках можна підтримувати плюсову температуру до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Термобарокамери оснащено вакуумною системою, що забезпечує вакуум до 260 Па.

Термокамери виготовляють двох типів: *скринькові* (ТКСИ-0,1-70, ТКСИ-0,2-80) з завантаженням зверху та *шафові* (ТКШ-0,15 -100, ТКШ-1-100).

Термобарокамери випускають двох видів: ТБК-0,15-70 і ТБК-0,4-70А. Перша цифра в позначенні вказує корисний об'єм камери ( $\text{м}^3$ ), друга — нижчу температуру в камері ( $^{\circ}\text{C}$ ). Встановлена потужність камер — 6,3...19 кВт.

#### 4.9. Обладнання для створення контрольованих атмосфер

Атмосфери аміачної групи (ДА, ПСА-08) створюють в установці, технологічну схему якої зображено на рис. 4.21.

Рідкий аміак з балона 1 подається у випарник 2, що обігрівается електронагрівниками, і переходить у газоподібний стан. Далі аміак надходить у дисоціатор 3, де дисоціює на азот і водень у присутності каталізатора (ГК, КДА, залізна стружка) при температурі  $450\text{...}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Дисоційований газ повертається в змійовик випарника, віддає там свою теплоту на підігрівання та випаровування рідкого аміаку, потім промивається в скрубєрі від слідів аміаку і подається в камеру часткового спалювання 4.

Процес спалювання водню здійснюється в присутності каталізатора (шамотної цегли з порошком нікелю) при температурах,



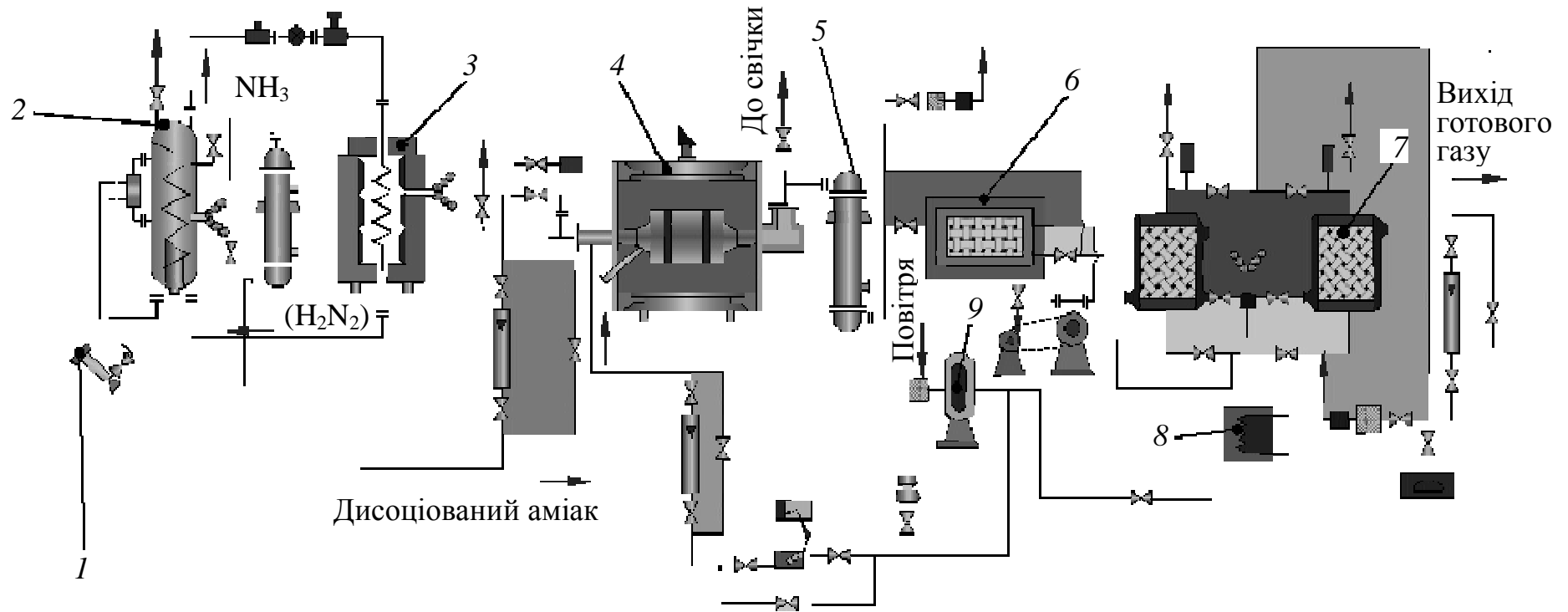


Рис. 4.21. Технологічна схема установки типу ДА

вищих за 1000 °С, з точним дозуванням повітря та газу. Вміст водню в газі знижується на 4...20 %. Газ просушується й охолоджується в скрубєрі 5 і холодильній машині 6. Остаточне сушіння газу до точки роси –40...–50 °С відбувається в скрубєрі 7. Скрубєр складається з двох працюючих по черзі колон, заповнених силікагелем. Оскільки процес поглинання вологи супроводжується виділенням теплоти, працююча колона зовні охолоджується водою. У цей час на іншій колоні відбувається відновлення адсорбуючої здатності силікагелю продуванням його гарячим повітрям. Гаряче повітря подається з повітродувної машини 9 крізь нагрівач адсорбера 8. Готовий газ через гідравлічний затвор та ротаметр надходить у піч.

Для створення атмосфер аміачної групи застосовують установки типів ДА-30С і ДА-60С продуктивністю 30 і 60 м<sup>3</sup>/год. Установки складаються з окремих балонів, які можна використати при компонуванні за іншими технологічними схемами: з дисоціацією аміаку і частковим спалюванням водню, з сушінням газу або без нього. Установки комплектуються контрольно-вимірювальною та регулювальною апаратурою.

Технологічну схему установки для утворення ендогазу показано на рис. 4.22.

Природний газ або випаруваний пропан-бутан через регулятор тиску 1 подається в камеру 2 для очистки від сірководню. Очистка виконується при температурі 300...400 °С в присутності каталізатора ГІАП-10. Очищений газ охолоджується в трубчастому холодильнику 3, змішується з повітрям і спрямовується в реторту з зовнішнім обігріванням 4, заповнену нікелевим каталізатором ГІАП-8, ГІАП-3. В реторті при температурі 1050 °С утворюється ендогаз. Після охолодження в трубчастому холодильнику 5 газ надходить до споживача.

Для створення ендотермічних атмосфер застосовують установки типів ЗН-16М02, ЗН-16М03, ЗН-250ГМ3 та ін. (цифри після дефіса показують продуктивність установки, м<sup>3</sup>/год). Установ-

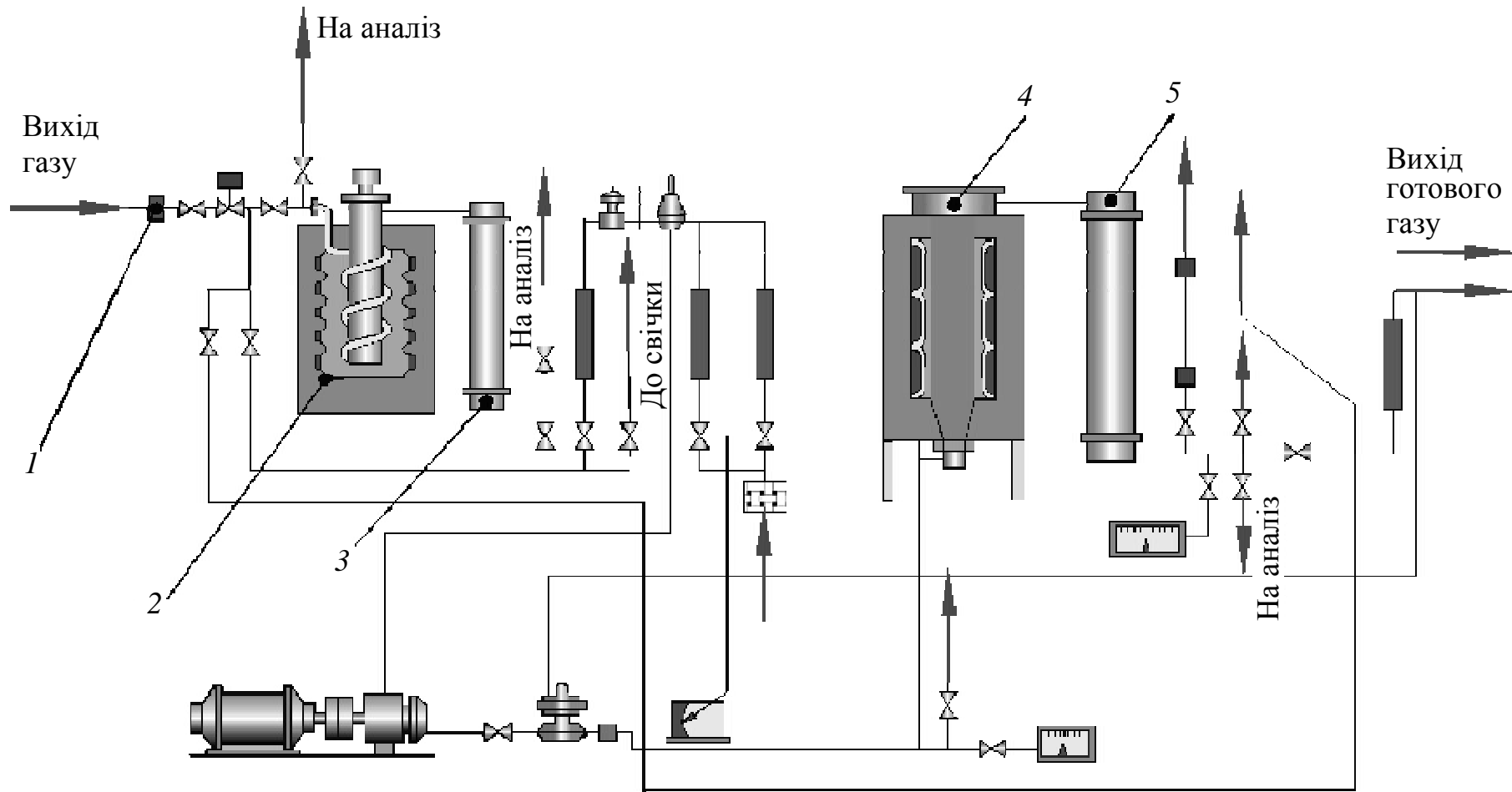


Рис. 4.22. Технологічна схема установки для утворення ендогазу

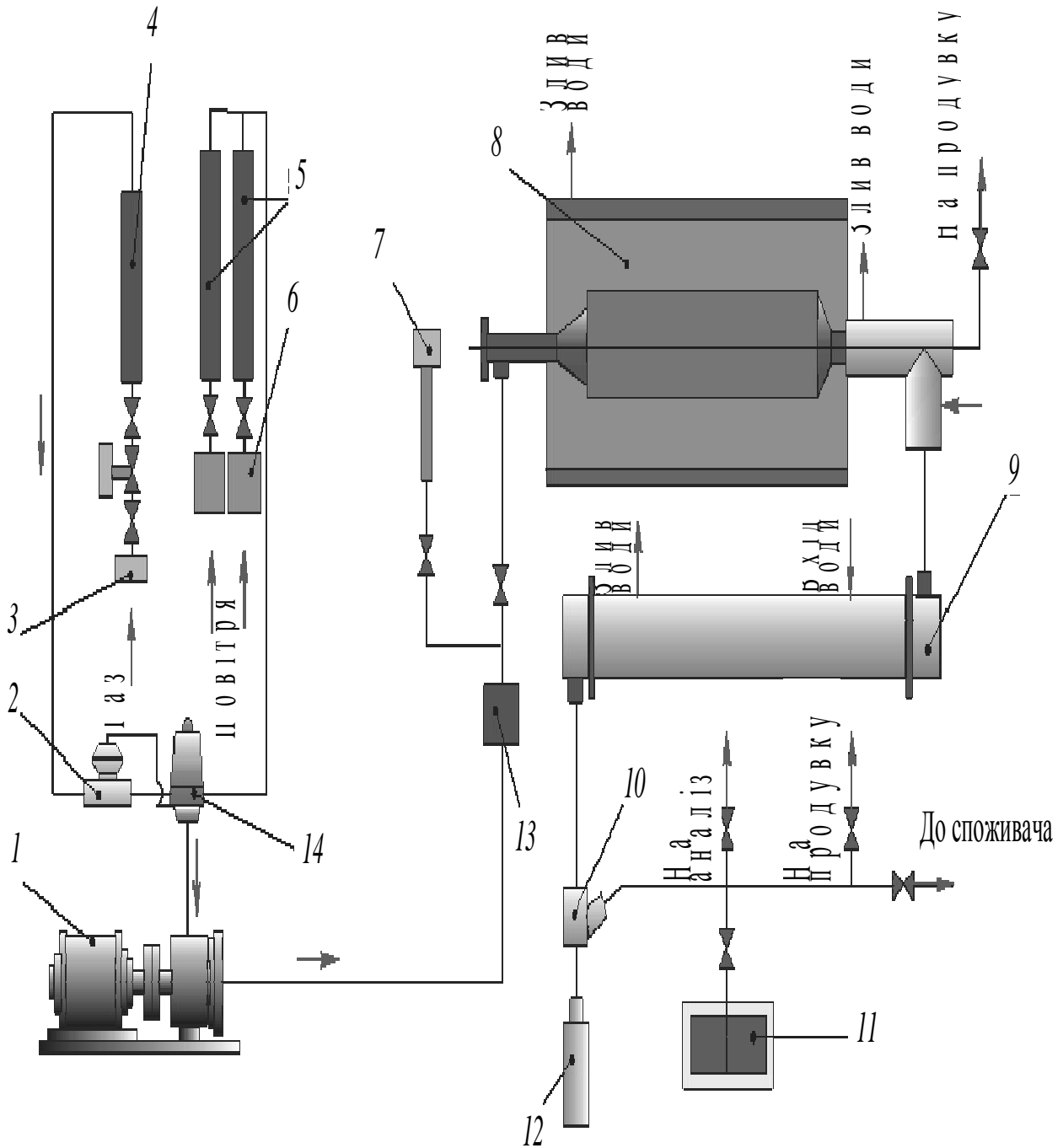


Рис. 4.23. Технологічна схема установки для утворення екзогазу

ки мають блокову конструкцію і обладнані системою автоматичного регулювання вологості атмосфери, пристроями гасіння полум'я та перекривання трубопроводів у випадку поширення полум'я з генератора в лінії газоповітряної суміші.

Технологічну схему установки для утворення екзогазу зображено на рис. 4.23.

Газ через регулятор тиску 3, ротаметр 4 і регулятор нульового тиску 2 подається в змішувач 14. Туди ж через фільтри 6 та ротаметри 5 надходить повітря. Із змішувача газоповітряна суміш спрямовується газодувкою 1 через полум'ягасник 13 у камеру спалювання 8 із запальником 7. Оскільки спалювання суміші супроводжується виділенням теплоти, камеру спалювання охолоджують водою. Утворений екзогаз охолоджується в холодильнику 9 і через краплевіддільник 10, минаючи поплавкову камеру 12 і тискомір 11, надходить до споживача.

Екзотермічні атмосфери створюють в установках типів ЗК-9М1, ЗК-60М1, ЗК-125М03, ЗК-1250М2 та ін. (цифри після дефіса показують продуктивність установки, м<sup>3</sup>/год). Установки мають блокову конструкцію. Залежно від вимог, які ставляться до екзогазу, установки доповнюють адсорберами для очищення від вологи, оксиду вуглецю (IV), аміаку, колонками конверсії оксиду вуглецю (II) тощо.

Азотну атмосферу створюють двома способами:

- перший спосіб ґрунтується на утворенні екзогазу ПС-09 з конверсією оксиду вуглецю (II) і наступному сушінні атмосфери. З цією метою установки для утворення екзогазу доповнюють колонками конверсії та адсорберами;
- другий спосіб більш економічний і прийнятний для термічних цехів машинобудівних заводів ґрунтується на дисоціації аміаку з спалюванням водню у присутності каталізатора та наступному сушінні в адсорберах.

Технологічну схему для створення азотної атмосфери другим способом реалізовано в установці типу АЗ-125М1 продуктивністю 125 м<sup>3</sup>/год.

Для глибокого очищення технічного аргону використовують установку типу ІО-6М2 продуктивністю 6 м<sup>3</sup>/год. Установка складається з ряду послідовно з'єднаних реакторів з поглиначами окремих складових газу (метану, оксиду вуглецю (II), кисню, азоту, водню). Оскільки поглинання домішок відбувається при підвищених температурах, після кожного реактора встановлено холодильник. Крім того, в технологічному ланцюзі установки передбачено адсорбери з силікагелем і цеолітами для сушіння газу.

#### **4.10. Обладнання для очистки деталей після термообробки та їх виправлення**

При контакті поверхні деталей з окисним газовим середовищем в області підвищених й особливо високих температур відбувається окиснення та зневуглецювання виробів, причому товщина пошкодженого шару з часом і підвищенням температури збільшується. Поширюючись углиб металу, окалина погіршує якість, підвищує загальну трудомісткість виготовлення виробів у зв'язку з виконанням очисних операцій і веде до безповоротних втрат металу. При нагріванні виробів у полумєневих печах втрати на окалину становлять 2...3 %, а нагрівання в електричних печах веде до ще більших втрат металу. Недопустиме є також зневуглецювання металу. Зневуглецьовані пружини є невиправним браком, інструмент втрачає різальні властивості, вироби мають нерівномірну (плямисту) твердість.

Розглянуті способи безокисного нагрівання не забезпечують повний захист виробів від контакту з окисним середовищем. Так, при перенесенні виробів з печі у гартівну ванну утворюється тон-

кий наліт окалини. Незначне окиснення поверхні деталей відбувається також при нагріванні в соляних ваннах та СВЧ.

Завдяки безокичному нагріванню скоротилась потреба в очистці виробів, але повністю ліквідувати очисні операції не вдалося, і їх ще застосовують в термічних цехах. Крім очищення від окалини, очисні операції використовують також для видалення залишків солей, мастила й інших забруднень.

Для очистки поверхні термічно оброблених виробів застосовують різноманітні способи:

- дробоструминний;
- гідроабразивний;
- металевим піском;
- травленням.

Спосіб очистки вибирають залежно від характеру дефекту поверхневого шару, який потрібно усунути очисткою, маси виробу та ін. Для видалення з поверхні масивних виробів шару окалини значної товщини (пластової окалини) використовують *дробоструминні установки*. Така установка має вигляд герметично закритої камери з конвеєрним обладнанням і столом: нерухомим, обертовим або прохідним для розміщення виробів. На поверхню виробів крізь сопла під тиском стисненого повітря спрямовується струмінь дробу або дрібнонасічених шматочків сталевого дроту. Відпрацьований дріб відсіюється від окалини і використовується повторно.

Для очистки виробів масою до 400 кг випускаються обертові дробометні столи моделей 345, 353, більш масивних деталей — очисні камери моделей ДК-10М, 372М, 867М, 374С та ін.

У деяких випадках для очистки виробів від окалини застосовують *заточувальні верстати* моделей 3Б633, 8Б634, 3А382 тощо.

До недавнього часу в термічних цехах часто використовували очистку виробів сухим кварцовим піском. Через небезпеку професійного захворювання працівників-піскоструминників си-

лікозом така очистка заборонена. В окремих випадках дозволяється застосування цього способу очистки за узгодженням із санепідстанцією. При цьому має бути виключений контакт працюючих із кварцовим пилом, а запиленість атмосфери повинна задовольняти нормам Державної санітарної інспекції.

Більш прогресивною є *гідроабразивна очистка*, яка повністю виключає пиловиділення. Недоліком гідроабразивної очистки є необхідність використання спеціальних герметизованих апаратів і додаткових операцій корозійного захисту виробів. В деяких випадках гідроабразивна суміш та волога негативно впливають на працюючих. Порівняно з піскоструминною очисткою продуктивність праці при гідроабразивному способі нижча.

При гідроабразивній очистці на поверхню виробів, розміщених у бункері, за допомогою стисненого повітря подають потужний струмінь гідроабразивної суміші. Для очистки сталевих виробів застосовують суміш, що складається з 30 % води і 70 % піску; чавунних виробів — 60...50 % води та 40...50 % піску, кольорових металів і сплавів — 80 % води та 20 % піску. Для запобігання корозії в суміш додають 0,8...1 % кальцинованої соди або 0,5...1 % нітрату натрію. Після очистки вироби промивають і піддають додатковій антикорозійній обробці.

Безперервне вдосконалення способів очистки виробів дало можливість виконувати до 90 % всіх очисних операцій без використання кварцового піску, замінивши його металевим. Найчастіше застосовують чавунний пісок, який дістають розмелюванням чавунного дробу з наступним просіюванням. Для очистки виробів металевим піском використовують таке саме обладнання, як і при очистці кварцовим піском, без суттєвої його модернізації. Спосіб має високу продуктивність. Найкращі результати очистки отримують, якщо металевий пісок виготовлений з того матеріалу, що й оброблювані вироби.

Для очистки дрібних, а також ріжучих інструментів та виробів застосовують *корундову крихту* — регенеровані абразивні зе-



рна електрокорунду з розмелених відходів та використаних абразивних кругів.

Абразивну очистку виконують на установках, що випускаються серійно.

Заготовки з припуском на механічну обробку (поковки, вилки та ін.) після термообробки піддають хімічному травленню у водних розчинах сірчаної кислоти (8...12 %) при температурі 40...80 °С або у водних розчинах соляної кислоти (10...20 %) при температурі 30...60 °С. Для зменшення витрат металу в суміш ванни додають спеціальні присадки. Після травлення вироби промивають у холодній або підігретій воді чи піддають нейтралізації в гарячому лужному розчині з наступним промиванням.

Хімічне травлення виробів здійснюється в травильній машині з підйомно-поворотним краном, що має чотири горизонтальних балки-коромисла.

За допомогою плунжера кран може піднімати й опускати кошики з деталями, а в піднятому положенні може повертати їх у горизонтальній площині на 90°. Під краном розміщуються три баки: з травильним розчином, гарячою та холодною водою. Під четвертою балкою знаходиться розвантажувально-завантажувальна площадка. Послідовно переміщуючись із бака в бак, деталі піддаються травленню і промиванню. Продуктивність машини — до 3,6 т/год.

Більш прогресивним способом очистки деталей від окалини є *електролітичне травлення*. Його застосовують для очистки деталей з дрібним різьбленням, гострими лезами та ін. При електролітичному травленні деталь є одним з електродів в електроліті відповідного складу, у зв'язку з чим розрізняють *анодне* і *катодне* травлення. Розрихлення та відрив окалини здійснюється киснем або воднем, які виділяються на поверхні деталі при проходженні електричного струму. Для анодного травлення використовують слабкі водні розчини солей або кислот, для катодного — 10...15 %-й розчин сірчаної кислоти. Травлення ведуть при на-

прузі 5...12 В, густині струму 1...10 А/дм<sup>2</sup>, тривалість процесу становить 10...15 хв. Після травлення деталі промивають і сушать.

Ванни для електролітичного травлення, знежирювання та промивання виготовляють з листової сталі, які мають прямокутний переріз. Ванни покривають хімічно стійкими матеріалами: гумою, вініпластом та ін. Для підігрівання розчинів у ванни занурюють труби, які обігривають паром або вводять пару безпосередньо в розчин (гостра пара). Джерелом живлення ванн є мотор-генератори потужністю 3...30 кВт і випрямлячі. Травильне обладнання монтують в ізольованих приміщеннях, обладнаних потужною припливно-витяжною вентиляцією.

Для знежирення та очистки деталей невеликих розмірів зі стійким забрудненням часто застосовують *ультразвукову очистку*. Ультразвукова очистка ґрунтується на явищі кавітації, тобто потужних гідравлічних ударах, що виникають на поверхні деталей, занурених у рідину, при пропусканні через неї ультразвукових коливань. Після очистки деталі просушують паром. Для ультразвукової очистки деталей використовують агрегати типів УЗА-1 й УЗА-2.

*Механічну очистку* деталей виконують на дробо- та гідропіскоструминних установках.

Для очистки деталей від солей, мастил і забруднень в одиничному та малосерійному виробництвах застосовують *промивні баки*, а в багатосерійному і масовому — *мийні машини*. Мийні середовища — це гарячі лужні або содові розчини, розчини рідкого скла з домішками емульсолу, розчини синтетичних мийних засобів, трихлоретан та ін.

Промивний бак оснащено змішувачем для підігрівання розчину. Для кращого перемішування розчину у бак подають стиснене повітря. Суміш мийного розчину, мастил і забруднювачів, що утворюється при промиванні деталей, перекачується в мастильновіддільник і через фільтр повертається на повторне викорис-

тання. Мастила зливаються у відстійник. Після промивання деталі просушують на повітрі.

Мийні машини випускають кількох типів: *конвеєрні* з похило-замкненим конвеєром, одно- та двосекційні типу МКП; *баранні* зі шнековим конвеєром, двосекційні типу ММБ; з *горизонтальним штовхачем і крокуючим конвеєром*, одно- і двосекційні для миття великих деталей типу ММТ; *роликові* типу ММР із підвісним конвеєром типу ММЕ. Цифри після літерного позначення вказують основні розміри робочого простору (дм) — ширину, висоту, довжину. Випускаються також *автоматичні* мийні машини моделей С3140.02, 030-696А та ін.

У сучасних конструкціях машин подачу мийного розчину здійснюють найефективнішим й економічним методом здушування. Розчин розігрівають гострою парою або трубчастими (газовими, електричними) нагрівниками. Мийний розчин подається насосами під тиском. Тривалість миття регулюється годинниковим механізмом. Машини обладнано мастильновіддільником, фільтрами, системою відсмоктування парів.

Після мийної машини встановлюється сушильна камера, в якій деталі просушуються спрямованим потоком повітря, нагрітого до 120 °С.

Виправлення деталей здійснюють на *ручних, механічних і гідравлічних* пресах. Ручні рейкові та механічні гвинтові преси застосовують для виправлення деталей невеликого перерізу.

Найпоширенішими є гідравлічні преси типів П6320, П6322, П6324, тощо з зусиллям 100...2500 кН.

Гідравлічна система пресів працює на мастилі. Преси наділено обмежувачами довжини ходу правильного інструмента. Контроль якості виправлення здійснюється за допомогою індикаторів годинникового типу.

#### 4.11. Підйомно-транспортне обладнання

У термічних цехах для завантаження і розвантаження печей, переміщення піддонів та деталей від одного до іншого агрегату використовують підйомно-транспортне обладнання: талі, крани, конвеєри та ін.

Найпростішим підйомним пристроєм є *електричний таль*. Підняття вантажу електричним талем здійснюється сталевим канатом, який намотується на барабан, що обертається від електродвигуна. Вантажопідйомність електричних талів становить 5 т.

Електричний таль, підвішений до монорельсового візка, який переміщається вручну або електродвигуном, називається *електротельфером*.

Для переміщення важких конструкцій і виробів застосовують електричні самохідні одно- та двобалкові *крани* вантажопідйомністю 5 т і більше. Розвантаження та завантаження шахтних печей здійснюють за допомогою поворотних і пересувних кранів, електричних та пневматичних *підйомників*. Для завантаження і розвантаження піддонів та цементаційних ящиків великої маси з камерних печей і гартівних баків використовують *маніпулятори*.

Переміщення піддонів, цементаційних ящиків й окремих деталей у печах безперервної дії здійснюється *роликowymi конвеєрами*, які можна переносити в будь-яке місце. Деталі від гартівних баків до відпускних печей, мийних машин та на ділянці контролю передаються *ланцюговими конвеєрами*, рух яких відбувається по замкненій трасі.

Для обслуговування автоматизованих камерних печей, мийно-сушильних машин, печей відпуску застосовують самохідні транспортні завантажувально-розвантажувальні *візки*, що переміщуються по напрямних рейках уздовж печей. Робочий стіл візка складається з двох направляючих із роликами, між якими розміщено штовхач для зштовхування і виштовхування садки. Візок має блок керування, що забезпечує завантаження та вивантажен-

ня печей в автоматичному режимі за введеною в блок програмою. Точність роботи механізму при автоматичному циклі становить  $\pm 0,8 \dots 1$  мм.

Транспортування деталей всередині цеху і між цехами виконується *електрокарами* з вилочним захватом вантажопідйомністю 1,5 та 5 т. Для електрокар виготовляють універсальні контейнери.

Для обслуговування обладнання термічних цехів можна використовувати *промислові роботи*. Робот типу УМ-1Т призначений для обслуговування термічних печей, соляних ванн, гартівних баків; робот типу УМ-Ш — для виконання різних технологічних операцій в умовах підвищеної запиленості повітря (наприклад, для обслуговування дробострумінних установок). Вантажопідйомність промислових роботів становить 10 кг, точність виконання операцій при встановленні деталей — від  $\pm 0,1$  до  $\pm 2$  мм.

#### 4.12. Контрольно-вимірювальні прилади

Точність виконання технологічного режиму і висока якість термообробки виробів забезпечуються безперервним контролюванням та регулюванням параметрів технологічного процесу, які здійснюються за допомогою контрольно-вимірювальних, регулювальних і реєструвальних приладів. Функціональна схема вимірювального пристрою завжди включає *первинний прилад* — датчик, що сприймає та перетворює контрольовану величину на вихідний сигнал, зручний для підсилення, передачі на відстань і вимірювання, а також *вторинний прилад*, призначений для вимірювання, реєстрації та регулювання контрольованої величини.

Найважливішим параметром технологічного процесу термообробки деталей є температура. Температуру вимірюють двома способами: *контактним* або *безконтактним*. При контактному способу вимірювання використовують термометри, термопари та

термометри опору. При безконтактному способі датчиками служать телескопи пірометрів випромінювання.

Найпростішими датчиками температури є рідинні *термометри розширення* скляні, принцип дії яких ґрунтується на тепловому розширенні рідини. Рідинні термометри застосовують для вимірювання температури від  $-100$  до  $650$  °С. Робочою рідиною в таких термометрах служать ртуть, спирт, гас або толуол. Недоліки скляних термометрів: велика теплова інерційність, неможливість дистанційної передачі й автоматичної реєстрації показів.

Дія *манометричних термометрів* ґрунтується на зміні об'єму рідини, газу або пари, які знаходяться в замкненому просторі при зміні температури, що приводить до зміни тиску. Тиск перетворюється манометричною пружиною на переміщення вказівної стрілки приладу.

Манометричні термометри випускаються кількох типів:

- електроконтактні ЗКТ і ТПГ-СК — для сигналізації або автоматичного керування за мінімальним та максимальним значеннями температури;
- термічні ТС-100 — для вимірювання і сигналізації при змінах температури;
- манометричні ТСТ — для вимірювання й автоматичного запису температури.

Манометричні термометри застосовуються в діапазоні температур  $-60...+500$  °С. Вони відзначаються незначною вартістю та простотою монтажу, але є інерційними та складними в ремонті.

*Термопара* (рис. 4.24) — це спай двох різнорідних провідників або напівпровідників (термоелектродів).

Зварені кінці 1 термопари називають *робочим* (або *гарячим*) *спаєм*. Спай занурюють у середовище, температуру якого необхідно виміряти. Вільні кінці 2 термопари називають *холодними*. За допомогою компенсаційних проводів 3 їх приєднують до мілівольметра 4. Якщо температура робочого і вільних кінців термопари різна, то в термопарі виникає термоелектрорушійна сила.

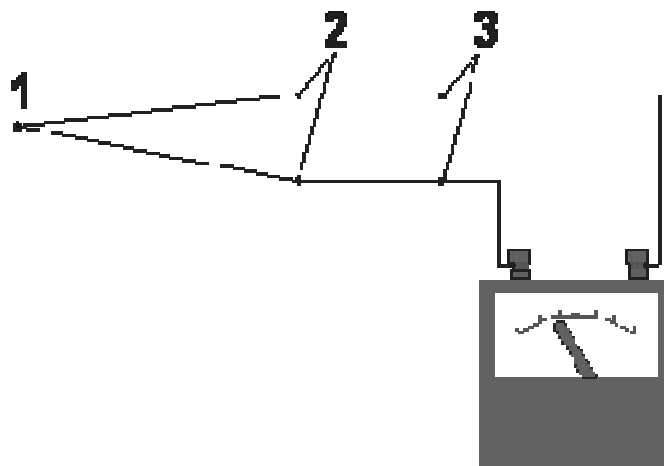


Рис. 4.24. Приєднання термопар до мілівольтметра

Значення термоелектрорушійної сили залежить від матеріалу електродів та різниці температур між робочим спаєм і вільними кінцями. Температуру вільних кінців термопар підтримують постійною.

Характеристика найпоширеніших термопар наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Характеристика найпоширеніших термопар

Тип термопар	Матеріал термоелектродів	Вимірювана температура, °С	
		тривала	короткочасна
ТПП	Платинородій (10% родію)	-20...+300	1600
ТПР	Платинородій (30% родію)	300...600	1800
	Платинородій (6% родію)	300...1600	-
ТХА	Хромель-алюмель	50...+1000	1300
ТХК	Хромель-копель	-50...+600	800
ТНС	Сплав НК—СА	300...1000	-
ТВР	Вольфрам +5% ренію вольфрам +10% ренію	0...1800	2000

Термопари виготовляють з указаних в таблиці матеріалів. Для захисту від пошкодження їх поміщають у захисну арматуру.

Принцип дії *термометрів опору* ґрунтується на властивості металів або напівпровідників змінювати свій опір при зміні температури.

*Металеві термометри опору* виготовляють намотуванням дроту на ізоляційний каркас. По виду матеріалу поділяються на термометри опору *платинові* — ТСП (для вимірювання температур в діапазоні  $-200...+650$  °С) та термометри опору *мідні* — ТСМ (для вимірювання температур в діапазоні  $-50...+180$  °С).

*Напівпровідникові термометри опору (термістори)* порівняно з металевими мають менші розміри, вищу чутливість і малу інерційність. Промисловість випускає близько сотні типів термісторів для вимірювання температури в різних діапазонах температур в інтервалі  $-100...+300$  °С (типи КМТ-1, КМТ-4, СТ-35 та ін.).

Вуглецевий потенціал контрольованої атмосфери регулюють зміною вмісту одного з трьох газів: парів води, оксиду вуглецю (IV) або метану. Це дає змогу визначити вуглецевий потенціал непрямым методом — за точкою роси газу або за кисневим потенціалом.

*Датчик для визначення точки роси газу* — це пористий ебонітовий стержень, насичений хлористим літієм. Опір стержня змінюється в широкому інтервалі залежно від вологості газу. Датчиком для визначення кисневого потенціалу служить твердоелектролітна пробірка, виготовлена у вигляді запаяної з одного кінця трубки, що має киснево-аніонну провідність. Різниця потенціалів між електродами пробірки залежить від концентрації кисню у повітрі, яким обдувають трубку зсередини, та в газовому середовищі, в якому знаходиться пробірка.

Для вимірювання тиску і витрат рідини та газів застосовують *мембранні* та *сильфонні* датчики з електричним або пневматичним вхідним сигналом. Датчики використовують в комплекті з вторинними вимірювальними, самописними і регулювальними



приладами: мілівольтметрами, логометрами, потенціометрами, електронними приладами та ін.

Найдосконалішими і поширеними є *автоматичні електронні прилади*. За типом вимірювальної схеми їх поділяють на потенціометри, врівноважувальні мости, прилади з диференціально-трансформаторними та феродинамічними перетворювачами. Показові, самописні, регульовальні прилади обладнано пристроями для автоматичного запису значень параметра на діаграмному папері у вигляді стрічки або диска, а також пристроями для регулювання параметра.

*Електронні потенціометри* працюють у комплекті з термопарами й іншими датчиками, що перетворюють значення вимірюваного параметра на напругу постійного струму. Принцип дії їх ґрунтується на врівноваженні електрорушійної сили (ЕРС) датчика однаковою за значенням, але протилежною за знаком ЕРС стороннього джерела струму (нормального елемента). Врівноваження здійснюється автоматично знаходженням такого положення повзунка на реохорді мостової схеми, коли ЕРС датчика й ЕРС нормального елемента будуть взаємно скомпенсовані. З датчиком реохорди з'єднані стрілка і перо приладу, які фіксують значення параметра на шкалі та діаграмі.

В промисловості використовуються електронні потенціометри типів ЗПП, ЗПД, ЗПВ, ПП, ПС, П, ПСМ та ін.

*Електронні врівноважувальні мости* працюють у комплекті з термометрами опору. Опір термометра в цих приладах визначається автоматично за трьома відомими опорами мостової схеми. Прилади мають позначення МСМ, МСМР, МПЧ, МСР,ЗМВ, ЗМД, ЗМП тощо.

В *електронних приладах із диференціально-трансформаторним або феродинамічним перетворювачем* механічне переміщення чутливого елемента датчика зумовлює переміщення осердя трансформатора або поворот струмової рамки, що знаходиться в електромагнітному полі котушки збудження. Це приво-

дить до зміни напруги індуктованого в котушці або рамці струму, яка фіксується приладом. Прилади призначені для контролю, запису і регулювання витрат рідини та газу, рівня рідини, тиску й інших параметрів.

У промисловості застосовують прилади з диференціально-трансформаторними перетворювачами типів ЗИВ2, ДС1, ДСР1, ДСМ2, ДСМР2 і прилади з феродинамічними перетворювачами типу ВСФ.

Сучасною промисловістю випускаються більш досконалі автоматичні електронні прилади серії К: КП — показові, КВ — показові з обертовою шкалою та КС — самописні. Електронні прилади мають такі позначення: КПП, КВП, КСП — потенціометри; КМП, КВМ, КСМ — врівноважувальні мости; КСФ — прилади з феродинамічним перетворювачем; КСД — прилади з диференціально-трансформаторним перетворювачем; КПУ, КВУ, КСУ — прилади уніфікованого сигналу.

Пірометри випромінювання випускаються чотирьох типів: оптичні, радіаційні, фотоелектричні та кольорові.

Схему оптичного пірометра із зникаючим волоском, показано на рис. 4.25.

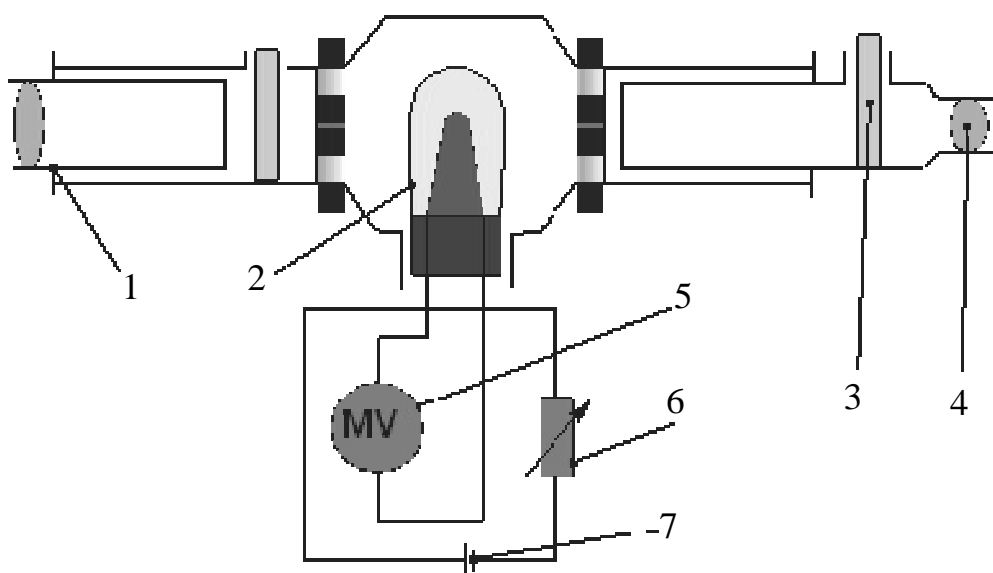


Рис. 4.25. Принцип дії оптичного пірометра

Світловий потік від нагрітого тіла крізь об'єктив *1*, світлофільтр *3* й окуляр *4* потрапляє в око спостерігача. Між об'єктивом і окуляром поміщено лампу розжарювання *2*, яка живиться струмом від батареї *7*. Регулюючи розжарення лампи реостатом *6*, досягають збігу яскравості волоска лампи та яскравості джерела випромінювання, тобто коли частина зображення волоска зникає на фоні зображення джерела. Відлік температури ведуть за шкалою приладу *5*.

Промисловість випускає оптичні пірометри типів ОПШІР-017, «Луч», а також мікропірометри ПМП-066М, ВИМП-0,15М, ОМП-054 та ін. Інтервал вимірювання температури оптичними приладами становить 400...6000 °С.

*Радіаційні пірометри* вимірюють повну (світлову і теплову) енергію випромінювання тіла. У телескопі цього приладу встановлено термобатарею, що перетворює енергію, яку випромінює поверхня нагрітого тіла, на термо-ЕРС. Остання вимірюється вторинним приладом.

Найбільшого поширення отримали радіаційні пірометри типів «Рапир» та ПРК-600. Розпочато серійний випуск нових пірометрів типів ВПР-40, РПК-101. Радіаційні пірометри забезпечують вимірювання температури в межах 400...2000 °С.

У *фотоелектричних пірометрах* для вимірювання яскравості використовуються фотоелементи. Фотострум вимірюється вторинним приладом, що забезпечує вимірювання, запис, сигналізацію і регулювання температури. Межі вимірювання температури фотопірометрами типів ФЗП, ФП, ФПР, які випускаються серійно, становлять 200...4000 °С.

*Кольорові пірометри* вимірюють температуру за відношенням інтенсивностей монохроматичного випромінювання тіла для двох діапазонів довжин хвиль червоного та синьо-зеленого видимого спектрів. Межі вимірювання температури — 300...2800 °С. Серійно випускаються кольорові пірометри типів ЦЗП-3, РЗД-

018, «Спектропир». Кольорові пірометри призначені для реєстрації і регулювання температури.

Контроль температури деталей при використанні швидкісних методів нагрівання (індукційний, контактний та ін.) часто виконують за допомогою термопар із записом кривої нагрівання й охолодження на *шлейфному осцилографі*. Температуру, час нагрівання та охолодження деталей визначають за осцилограмою. При постійних електричних параметрах процесу (напруги, сили струму індуктора і контуру) температуру деталей контролюють за допомогою *реле часу*.

Вимірювання та регулювання вуглецевого потенціалу контрольованих атмосфер виконують за допомогою приладів для визначення вологості газу (точки роси) і газоаналізаторів.

Для періодичного вимірювання точки роси використовують *конденсаційні гігрометри*. Принцип дії гігрометрів ґрунтується на вимірюванні температури охолоджуваного металевого дзеркала в момент конденсації на ньому вологи, яка міститься в газі, що аналізується. Дзеркало охолоджують вуглекислотою, рідким азотом або напівпровідниковою термобатареею. Гігрометри типів ИИГ-1, ВИГ-2М, ВИГ-3 тощо дають змогу вимірювати точку роси в межах  $+30...-60$  °С.

Автоматичний контроль та регулювання складу атмосфери в ендогенераторах і печах здійснюють за допомогою установки «Иней-1». Робочий діапазон вимірювання точки роси становить  $+20...-85$  °С.

Для вимірювання та регулювання складу пічної атмосфери широко застосовують *інфрачервоні газоаналізатори*. Принцип дії цих приладів ґрунтується на здатності складних газів (СО, СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub> та ін.) поглинати інфрачервоні промені певної довжини хвилі. Ступінь поглинання променів залежить від концентрації газу в суміші. Енергія інфрачервоного випромінювання визначається конденсаторним мікрофоном з оптико-акустичним ефектом.

Серійно випускаються інфрачервоні газоаналізатори типів ОА-2209 (за  $\text{CO}_2$ ), ОА-2309 (за  $\text{CH}_4$ ) тощо. На їх основі компонують установки для автоматичного контролю і регулювання вуглецевого потенціалу при цементації та нітроцементації деталей (наприклад, установка типу ОНМ-11).

Знаходять застосування також *газоаналізатори абсорбційного типу, фотоколориметричні прилади* та ін.

Для регулювання тривалості технологічних операцій і керування механізмами термічного обладнання використовують *електронні та моторні реле часу* типів ВЛ, РВЧ і ВС з різними діапазонами витримки (від 1 с до 24 год). Регулювання тривалості витримки кількох операцій технологічного процесу за заданою програмою здійснюється спеціальними багатоланцюговими реле часу — *командоелектроприладами*.

#### **4.13. Автоматизація технологічних процесів термообробки**

Дотримання високої якості термообробки виробів у сучасних термічних цехах забезпечується автоматизацією контролювання і регулювання параметрів технологічних процесів, а також автоматизацією керування механізмами та транспортними засобами термічного обладнання.

Регулювальні пристрої або вмонтовують у вторинні прилади, або виконують у вигляді окремої приставки приладного типу. Найпростішим регулювальним пристроєм є *реле*, що вмикає електричне коло живлення виконавчого механізму при дії покажчика (стрілки) вимірювального приладу.

Залежно від типу вторинного приладу застосовуються такі регулювальні пристрої: *електричні позиційні багатоканальні, електричні або пневматичні безперервної дії*. Регулювальні пристрої призначені в основному для регулювання в часі одного параметра або співвідношення двох параметрів.

Для регулювання складних технологічних процесів, коли потрібно здійснювати через певні проміжки часу підвищення або зниження температури, змінювати склад газу тощо, використовують *програмні регулювальні та задавальні пристрої*. Програмні пристрої випускають серійно з максимальною тривалістю циклу програми 500 год.

Сигнали від керуючого або регулювального пристрою подаються на виконавчий механізм, який завдяки додатковій енергії здійснює переміщення регулюючого елемента (клапана, заслінки, крана, шибера, повзуна та ін.).

Найчастіше застосовують *електричні виконавчі механізми*: контактори, магнітні пускачі, електромагнітні й електромоторні приводи.

У деяких випадках використовують *гідравлічні виконавчі механізми* (сервомотори з кривошипним механізмом) і *пневматичні виконавчі механізми* мембранного типу.

Автоматичне регулювання теплового режиму в печах з газовим обігріванням здійснюється вимірюванням кількості газоповітряної суміші, що подається до пальників, та підтримкою постійного співвідношення об'ємів газу і повітря. При використанні інжекторних пальників з активним повітряним струменем, в яких інжекція газу здійснюється повітрям, співвідношення витрат газу та повітря регулюється зміною подачі повітря. При цьому тиск газу перед пальниками підтримується нульовим. Витрати повітря змінюють мембранним виконавчим механізмом, на який діє ізохорний пневматичний регулятор електронного потенціометра, який вимірює температуру пічного простору.

Тепловий режим в електричних печах регулюють ступінчастою або плавною зміною потужності. Це регулювання здійснюють такими способами:

- перемиканням нагрівників печі з «трикутника» на «зірку»;
- вмиканням послідовно з піччю регульованого активного або реактивного опору;

- живленням печі через регулювальний трансформатор або автотрансформатор з перемиканням на різні ступені напруги;
- зміною потужності печі за допомогою напівпровідникових приладів.

Найефективніша плавна зміна потужності, що подається до печі, яка досягається за допомогою напівпровідникових приладів або трансформаторів.

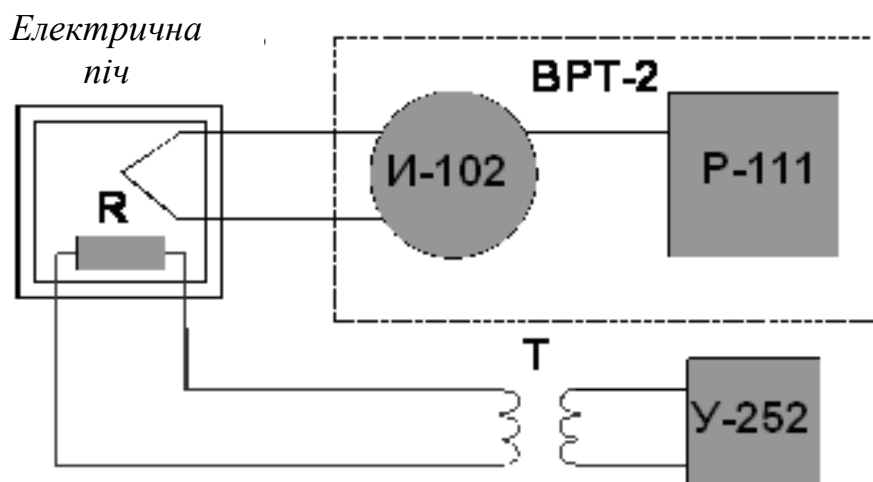


Рис. 4.26. Схема системи регулювання температури електричної печі за допомогою регулятора ВРТ-2

На рис. 4.26 зображено схему системи регулювання температури електричної печі за допомогою регулятора ВРТ-2.

Сигнал термопар, яка вимірює температуру робочого простору печі, підсилюється вимірювальним блоком И-102 і надходить до регулювального блоку Р-111. Сигнал термопар керує безконтактним тиристорним блоком живлення У-252, який через трансформатор Т змінює потужність, що подається на нагрівник R. Схема забезпечує регулювання температури в печі з точністю до  $\pm 0,5$  °С.

Для керування процесом цементації, ціанування та нітроцементації виробів застосовують системи автоматичного регулювання вуглецевого потенціалу атмосфери. Наприклад, система АСГА-Ц вмикає автоматизовану систему газового аналізу атмос-

фери печі, вимірювачі температури, обчислювальні пристрої і виконавчий механізм, що керує регулювальними кранами подачі метану або повітря в різні зони печі. Система забезпечує регулювання вуглецевого потенціалу з урахуванням зміни температури в процесі хіміко-термічної обробки виробів за заздалегідь заданою програмою.

Системи автоматичного регулювання та керування технологічними процесами в термічних цехах доповнюються або поєднуються з електронними обчислювальними машинами. ЕОМ дають змогу визначати і підтримувати оптимальний режим технологічних процесів, забезпечуючи найвищу продуктивність обладнання. Такі системи називаються самоналагоджувальними, або *системи автоматичної оптимізації*.

Застосування автоматичного регулювання технологічних процесів сприяє підвищенню продуктивності обладнання, дає змогу раціонально використати теплову енергію, зменшити припуски на механічну і термічну обробку виробів, знизити вартість продукції.

Автоматизація процесів термообробки виробів з використанням роботів, розвиток мікропроцесорної техніки та робототехніки відкриває нові можливості автоматизації виробничих процесів.

Застосування роботів дає змогу вивільнити працюючих, які зайняті на монотонних трудомістких ручних операціях у цехах із шкідливими умовами праці, до яких належать термічні, підвищити продуктивність та якість продукції. Крім того, в умовах, коли часто змінюється номенклатура виробів, використання промислових роботів забезпечує необхідну гнучкість виробництва при нарощенні обсягів випуску продукції і скороченні трудовитрат.

Промислові роботи застосовуються в основному на порівняно простих операціях. Роботи діють за чітко спланованою циклічною програмою. Підвищення технічних можливостей роботів може бути досягнуто завдяки більшій рухливості їхньої маніпуляційної системи, тобто збільшенню кількості ступенів свободи



маніпуляторів, кількості рук і виконавчих механізмів. Це різко збільшить їхню продуктивність та в багато разів підвищить продуктивність праці порівняно з людиною. Якщо оснастити затискні пристрої промислових роботів різного роду датчиками й іншими засобами чуття, то зростуть їхні інформативність і пристосовуваність до умов навколишнього середовища.

На виробництві знаходять застосування промислові роботи двох типів: *універсальні* та *спеціалізовані*.

У перших робочий орган має мінімум шість ступенів свободи. Робот може розпізнавати предмети, з якими працює. Такі роботи сприймають інформацію з навколишнього середовища й використовуються на різних робочих місцях.

Спеціалізовані роботи призначені для виконання конкретних технічних задач.

Кожен робот містить чотири системи: виконавчу (маніпуляційну), інформаційно-вимірнювальну (сенсорну), керуючу (інтелекту) та систему зв'язку.

*Інформаційно-вимірнювальна система* призначена для забезпечення робота інформацією про стан навколишнього середовища і самого робота згідно з вимогами керуючої системи.

*Керуюча система* видає команди для маніпуляційної системи на підставі даних, одержаних від інформаційної системи, а також здійснює спілкування робота з людиною. Інтелектуальні можливості робота залежать від програмного забезпечення його керуючої системи.

*Система зв'язку* служить для обміну інформацією між роботом та людиною, а також іншими пристроями на умовній мові.

Промислові роботи і маніпулятори можуть замінити людину в термічних цехах на операціях завантаження та розвантаження термічного обладнання, складання виробів, що пройшли термообробку, в штабелі й розбирання штабелів, завантаження та розвантаження контейнерів з термічно обробленими виробами, та на допоміжних операціях у системах автоматичного контролю.

Аналіз існуючих видів термічного обладнання з позицій можливостей його обслуговування промисловими роботами показує, що передусім їх можна використовувати в установках гартування виробів СВЧ, полумєневих печах, пресах для правки та гартування зубчастих коліс тарілчастого типу, установках для гартування і гнуття пружин та ін.

Промисловість випускає досить широку за технічними параметрами гаму промислових роботів. Промисловий робот моделі «Універсал-15» має вантажопідйомність до 15 кг, переміщення руки по вертикалі 260 мм, а по горизонталі 1000 мм при куту повороту навколо вертикальної осі 330°. Роботи оснащено аналого-позиційною системою програмного керування.

Сучасні промислові роботи здатні працювати в досить жорстких умовах загазованості, запиленості повітря, у вибухонебезпечних середовищах, під дією високих температур. Точність позиціонування роботів досягає 0,1 мм.

Нові можливості автоматизації процесів термообробки виробів відкриваються при використанні роботів старшого покоління, які мають технічний зір, що надає змогу визначати місце розташування виробу та його положення в просторі.

## ПІСЛЯМОВА

Завершено викладення запланованого матеріалу для даної книги. Метою цієї праці було розкриття основних положень термічної обробки деталей і заготовок та розгляд структурних і фазових перетворень, що відбуваються в матеріалі при нагріванні та охолодженні.

Приведені основні види термічної обробки та їх обґрунтування, технологія поверхневого гартування та хіміко-термічної обробки деталей показують, що нехтувати термодинамічними параметрами у ряді випадків термічної обробки деталей машин недопустимо.

Отже, уміння розраховувати і враховувати оптимальні температурні параметри в практиці термічної обробки деталей машин стає нагальною необхідністю. В цьому плані матеріали даної книги можуть бути досить корисними.

Слід зауважити, що приведені конструкції сучасного термічного обладнання та рекомендації що до його використання при термічній обробці деталей машин, полягають не стільки в розрахунках конкретних об'єктів, скільки саме в ілюстрації можливостей використання матеріалів цієї книги. Якщо це допоможе зацікавленому читачеві знайти відповідь на ті чи інші питання теоретичного та практичного характеру термічної обробки деталей машин, то це буде основним доказом корисності даної книги.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Блантер М.Е. Фазовые превращения при термической обработке стали. М., Metallurgizdat, 1962. 268 с. с ил.
2. Белоус М. В., Черепин В. Т., Васильев М. А. Превращения при отпуске стали. М., «Металлургия», 1973. 231 с. с ил.
3. Бочвар А.А. Основы термической обработки сплавов. М.—Л., Metallurgizdat. 1940. 298 с. с ил.
4. Вологдин В.П. Поверхностная индукционная закалка. М., Оборонгиз 1947. 243 с. с ил.
5. Гевелинг Н.В. Поверхностная электротермообработка. М., ОНТИ, 1936 112 с. с ил.
6. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. М., Машгиз, 1960, 495 с. с ил.
7. Гуляев А.П. Металознавство М., "Металургія", 1977. 647 с.
8. Кальнер В.Д. Цементация й нітроцементация сталі. М., "Машинобудування", 1973. 40 с. з іл.
9. Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. М.. Metallurgizdat, 1950. 316 с. с ил.
10. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1969. 375 с.
11. Корецкий Я. Цементация сталі. Л., Судпромгиз, 1962. 232 с.
12. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска стали. М., Metallurgizdat, 1960. 64 с. с ил.
13. Лахтін Ю.М., Леонтьева В.П. Матеріалознавство. М., "Машинобудування", 1980. 493 с. з іл.
14. Лахтін Ю.М. Металознавство й термічна обробка металів. М., "Металургія", 1976. 407 с. з іл.
15. Лахтін Ю.М, Коган Я.Д. Азотування сталі. М., "Машинобудування", 1976. 254 з, з іл.
16. Лахтин Ю.М. Термическая обработка стали. Основы теории и технологии. М., «Машиностроение», 1973. 69 с.

17. Лозинский М.Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М. Изд-во АН СССР, 1958. 470 с. с ил.
18. Лысак Л.И., Николин Б. И. Физические основы термической обработки стали. Киев, «Техника», 1975. 303 с. с ил.
19. Минкевич Н.А. Курс термической обработки стали и чугуна. М.—Л. ОНТИ, НКТП, 1935. 655 с. с ил.
20. Мінкевич А.Н. Хіміко-термічна обробка металів і сплавів. М., "Машинобудування", 1965. 491 с. з іл.
21. Малышев Б.В. и Шмыков А.А. Контролируемые атмосферы. М., Машгиз. 1953. 371 с. с ил.
22. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М., «Металлургия», 1974. 400 с. с ил.
23. Петраш Л.В. Закалочные среды. М.—Л., Машгиз, 1953. 111 с ил.
24. Попов А.А. Теоретичні основи хіміко-термічної обробки сталі. Свердловськ, Metallurgizdat, 1962. 120 с. з іл.
25. Попов А.А., Попова А.Е. Изотермическая и термокинетическая диаграммы распада переохлажденного аустенита. Свердловск, Машгиз, 1961. 430 с. с ил.
26. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали. М., «Металлургия», 1973. 208 с. с ил.
27. Соколов К.Н. Технология термической обработки стали. М., Машгиз, 1954. 298 с ил.
28. Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М. «Машиностроение», 1972. 287 с. с ил.
29. Шепеляковский К.З. Технология термической обработки стали при индукционном нагреве. М., «Машиностроение», 1973. 52 с.
30. Штейнберг С. С. Термическая обработка стали. Свердловск — Москва. Metallurgizdat, 1945. 154 с. с ил.
31. Юргенсон А.А. Азотування в енергомашинобудуванні. М., Машгиз 1964. 120 с. з іл.

---

**ЗМІСТ**

ПЕРЕДМОВА .....	3
ГЛАВА 1. ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ.....	5
1.1. Температура й час.....	5
1.2. Перетворення при нагріванні та охолодженні сталі.....	6
1.2.1. Фазові перетворення в сталі при нагріванні.....	6
1.2.2. Фазові перетворення в сталі при охолодженні. С-подібна діаграма.....	9
1.2.3. Перлітне та проміжне перетворення аустеніту.....	11
1.2.4. Мартенситне перетворення.....	14
1.3. Обробка холодом.....	17
1.4. Вплив легуючих елементів на С-подібну діаграму.....	19
1.4.1. Вплив легуючих елементів на температури фазових перетворень.....	19
1.4.2. Структурні складові та властивості легованих сталей.....	21
1.4.3. Перлітне та проміжне перетворення в легованих сталях.....	22
ГЛАВА 2. ОСНОВНІ ВИДИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ....	26
2.1. Можливості зміцнювальної термічної обробки сталі.....	26
2.2. Основні види відпалу та їх призначення. Нормалізація.....	28
2.2.1. Види відпалу.....	28
2.2.2. Дифузійний відпал.....	28
2.2.3. Повний відпал.....	30
2.2.4. Неповний відпал.....	31
2.2.5. Рекристалізаційний відпал.....	33
2.2.6. Ізотермічний відпал.....	36
2.2.7. Відпал для зняття внутрішніх напружень.....	37

2.2.8. Нормалізація сталі.....	38
2.3. Гартування сталі. Основні види гартування та їх призначення.....	40
2.3.1. Режим нагрівання сталі.....	40
2.3.2. Види гартування та їх призначення.....	42
2.3.3. Вибір технологічних параметрів при охолодженні.....	45
2.3.4. Способи гартування сталі.....	51
2.4. Відпуск сталі. Види відпуску, структура, властивості та їх призначення.....	57
2.5. Старіння сталі.....	63
2.6. Загартованість і прогартованість сталі.....	66
2.7. Внутрішні напруження при гартуванні сталі.....	70
2.8. Види браку після термічної обробки та способи їх усунення.....	72
2.9. Види браку при відпуску сталі.....	74
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....</b>	
3.1. Поверхневе гартування.....	76
3.2. Індукційне високочастотне гартування.....	77
3.2.1. Принцип дії високочастотного нагрівання виробів.....	78
3.2.2. Особливості при нагріванні струмом ВЧ.....	79
3.3. Газополуменеве гартування.....	83
3.4. Хіміко-термічна обробка (ХТО).....	85
3.4.1. Основні процеси, що відбуваються при ХТО.....	86
3.4.2. Цементация.....	92
3.4.3. Азотування.....	112
3.4.4. Ціанування і нітроцементация.....	118
3.5. Дифузійне насичення металевих сплавів металами та неметалами.....	121
3.6. Взаємодія металів з газами.....	126

---

3.6.1. Призначення, склад і способи створення контрольованих атмосфер.....	129
3.7. Дефекти хіміко-термічної обробки металів.....	135
ГЛАВА 4. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕ- ТАЛЕЙ МАШИН.....	140
4.1. Класифікація обладнання для термічної обробки.....	140
4.2. Вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали.....	142
4.3. Джерела теплової енергії.....	144
4.4. Нагрівальні печі та установки.....	146
4.4.1. Камерні печі.....	146
4.4.2. Шахтні печі.....	152
4.4.3. Ковпакові та елеваторні печі.....	155
4.4.4. Вакуумні печі.....	157
4.4.5. Печі-ванни.....	158
4.5. Механізовані печі та агрегатне термічне обладнання безперервної дії.....	165
4.6. Обладнання для поверхневого нагрівання деталей.....	174
4.7. Обладнання для охолодження деталей.....	179
4.8. Установки для обробки сталі холодом.....	181
4.9. Обладнання для створення контрольованих атмосфер...	183
4.10. Обладнання для очистки деталей після термообробки та їх виправлення.....	189
4.11. Підйомно-транспортне обладнання.....	195
4.12. Контрольно-вимірювальні прилади.....	196
4.13. Автоматизація технологічних процесів термообробки.	204
ПІСЛЯМОВА.....	210
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	211



Навчальне видання

Молчанов Віталій Федорович

**ТЕРМІЧНА ОБРОБКА  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Навчальний посібник*

Підписано до друку \_\_.\_\_.\_\_. Формат 60?84 1/16  
Папір друк. Друк – різнограф. Ум-друк. арк. \_\_\_\_  
Тираж – 300. Зам. №

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру  
видавництв серія ДК № 1944

Друкарня  
51918, Дніпродзержинськ  
ДДТУ, вул. Дніпробудівська, 2