Тема 10 ТЕРМОМЕХАНІЧНА ТА ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛІ

10.1 Термомеханічна обробка сталі

Термомеханічна обробка є методом обробки сталі, який забезпечує більш високі механічні властивості у порівнянні з характеристиками, що отримують при звичайному гартуванні і наступному відпусканні.

Сутність термомеханічної обробки полягає у сполученні пластичної деформації сталі в аустенітному стані та її гартуванні. Формування структури загартованої сталі при термомеханічній обробці відбувається в умовах підвищеної щільності дислокацій, обумовлених пластичною деформацією. Розрізняють два основні способи термомеханічної обробки: високотемпературну та низькотемпературну.

При високотемпературній термомеханічній обробці (ВТМО) (рис.10.а , а) сталь деформують при температурах, що перевищує точку Ac_3, при якій сталь перебуває в аустенітному стані. Ступінь деформації становить 20…30%. Після деформування проводять відразу гартування (швидке охолодження) для запобігання розвитку процесу рекристалізації.

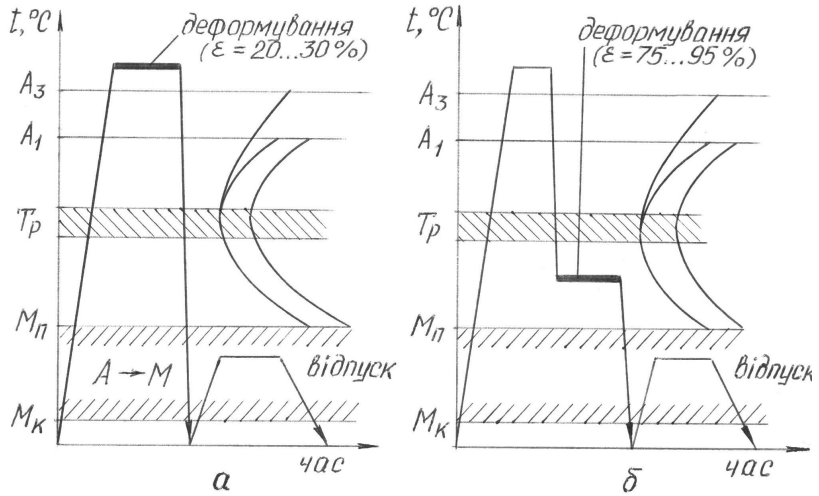

Рис.10.1 Графіки ВТМО (а) та НТМО (б)

При низькотемпературній термомеханічній обробці (НТМО) (рис.10.1 б) сталь деформують у температурному інтервалі існування переохолодженого аустеніту в області його відносної стійкості (400…600 ºС), при цьому температура, при якій здійснюється деформування, має бути вище точки *Мп*, але нижче температури рекристалізації. Ступінь деформації звичайно становить 75…95%. Гартування здійснюють швидким охолодженням відразу після деформування. Після гартування при ВТМО і НТМО проводять низькотемпературне відпускання з температурою нагрівання 100…300 ºС.

Механічні властивості після термомеханічної обробки машинобудівних сталей наведені в табл.10.1.

Таблиця 10.1

Механічні властивості сталі після термічної та термомеханічної обробки

Вид обробки	**$\sigma_в$, МПа**	**$\sigma_т$, МПа**	**δ, %**	**ψ, %**
НТМО	2400…2900	2000…2400	5…8	15…30
ВТМО	2100…2700	1900…2200	7…9	25…40
ТО	1400	1100	2	3

НТМО забезпечує більш високий рівень зміцнення сталі ніж ВТМО, але цей спосіб обробки потребує більш високих ступенів деформації, що в умовах відносно низьких температур, при яких відбувається процес деформування, можливо здійснити при умові наявності потужного устаткування для деформування. Тому в умовах машинобудівних підприємств здійснення НТМО пов'язано зі значними труднощами. НТМО неможливо реалізувати для вуглецевих і легованих сталей, які не мають області вторинної стабільності аустеніту.

10.2 Хіміко-термічна обробка

10.2.1 Сутність, призначення та основні процеси, що відбуваються при хіміко-термічній обробці сталі

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають технологічний процес дифузійного насичення поверхневого шару деталей різними елементами. Різні види хіміко-термічної обробки застосовують для

підвищення поверхневої твердості, контактної витривалості, стійкості до зношення, опору втомленості, а також для захисту від хімічної, електрохімічної та газової корозії.

При ХТО деталь розміщують у середовищі з високим вмістом елемента, який дифундує у метал. Процес насичення поверхневого шару металу цим елементом складається з трьох етапів.

На першому етапі відбуваються хімічні реакції у середовищі, в якому розміщена деталь, у результаті чого утворюються активні атоми елемента, який дифундує. Наприклад

$$CH_4 \rightarrow C_{ат} + 2H_2; \qquad (10.1)$$

На другому етапі процесу відбувається абсорбція або хемосорбція активних атомів поверхнею металу, в результаті чого дуже тонкий поверхневий шар насичується дифундуючим елементом, тобто відбувається процес абсорбції. Цей процес можливий тільки тоді, коли дифундуючий елемент здатний розчинятися в матеріалі деталі або утворювати з ним хімічні сполуки.

Третій етап – дифузійне проникнення елемента вглиб металу, що супроводжується утворенням твердих розчинів чи фазовою перекристалізацією. У результаті утворюється дифузійний шар зі змінною концентрацією дифундуючого елементу по перерізу (рис. 10.2).

Рис10.2. Зміна концентрації дифундуючого елементу по перерізу деталі: у – товщина дифузійного шару

Найбільш повільною ланкою ХТО є третій етап, тобто дифузійна стадія, коли формується структура і властивості поверхневого шару деталі.

Результати ХТО визначаються товщиною дифузійного шару та концентрацією насичуючого елементу у поверхневому шарі, а основними її технологічними параметрами є склад насичуючого середовища, температура та тривалість процесу.

Склад насичуючого середовища та температура визначають швидкість дисоціації сполук і утворення насичуючого елементу в атомарному вигляді. Температура, крім того, визначає швидкість дифузії насичуючого елемента в металі, яка залежить від коефіцієнту дифузії D.

Залежність коефіцієнта D від температури виражається рівнянням (10.2) і графіком (рис. 10.3).

$$D = Ae^{-\frac{Q}{RT}}; \qquad (10.2)$$

де A - коефіцієнт, який залежить від типу кристалічної гратки металу, що насичується; Q- енергія активації процесу дифузії; R- газова постійна; T- абсолютна температура.

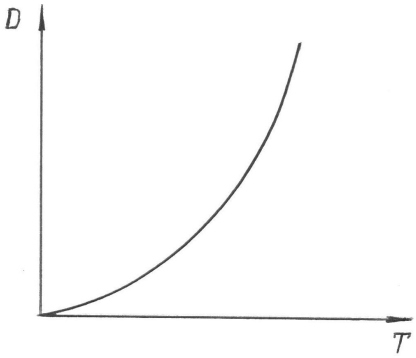

Рис.10.3. Графік залежності коефіцієнта дифузії D від температури T

Графік (рис. 10.3) показує, що коефіцієнт дифузії D зростає з підвищенням температури і, відповідно, тривалість ХТО суттєво залежить від температури процесу.

Тривалість процесу ХТО визначається потрібною товщиною дифузійного шару. При постійних параметрах процесу (температура, склад насичуючого середовища) збільшення товщини шару в часі підкоряється параболічному закону:

$$y = k\sqrt{\tau}\ ; \qquad (10.3)$$

Найбільш інтенсивно товщина дифузійного шару зростає на початку ХТО.

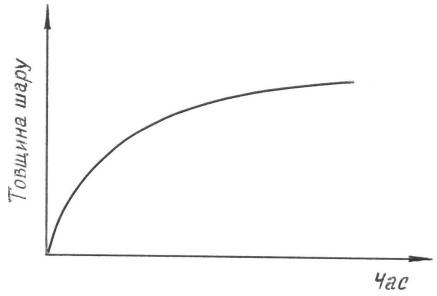

Рис.10.4 .Графік залежності товщини дифузійного шару від тривалості процеса ХТО

Товщина дифузійного шару залежить також від характеру твердого розчину, що утворюється, складу оброблюваного металу і концентрації дифундуючого елементу на поверхні деталі. Чим вища його концентрація елементу на поверхні, тим більша товщина шару при даній температурі та тривалості процесу насичення. Швидкість дифузії атомів насичуючого елементу, який утворює з оброблюваним металом тверді розчини проникнення, значно вища, ніж при утворенні твердого розчину заміщення. Тому при насиченні сталі металами (*Cr, Al, Si* тощо), які утворюють із залізом тверді розчини заміщення, процес проводять при вищих температурах і більш тривалий час. При цьому отримують меншу товщину дифузійного шару, ніж при насиченні азотом і вуглецем, які утворюють із залізом тверді розчини проникнення. Дифузія елементів у гратці Fe_{α} відбувається легше, ніж у гратці Fe_{γ}, адже γ-залізо щільніше упаковане.

В залежності від насичуючого елементу хіміко-термічну обробку сталі поділяють на такі види: цементація, азотування, ціанування (нітроцементація), дифузійне насичення сталі металами і неметалами.

10.2.2 Цементація сталі

Цементація – це технологічний процес дифузійного насичення поверхневого шару стальних деталей вуглецем.

Цементацію здійснюють для отримання твердої, стійкої до зношення поверхні, що досягається збагаченням поверхневого шару металу деталей вуглецем і подальшими гартуванням і низьким відпусканням. Крім того, після такого комплексного процесу підвищується границя контактної витривалості і границя міцності при згині і крутінні.

Для цементації звичайно використовують низьковуглецеві сталі, які містять 0,1...0,25 % вуглецю. Це забезпечує збереження серцевиною деталі, яка не насичується вуглецем при цементації, високої в'язкості після гартування. Поверхні деталі, які не підлягають цементації, захищають шаром міді завтовшки 0,02...0,05 мм. Цементації звичайно піддають деталі машин, які повинні мати стійку до зношення робочу поверхню і в'язку серцевину: зубчасті колеса, вали, пальці, розподільчі вали, кулачки, черв'яки тощо.

Цементацію проводять, як правило, при температурах, що перевищують точку Ac_3 (930...950 ^{0}C), при яких стійкою фазою є аустеніт, який розчиняє вуглець у великих кількостях.

Цементований шар має змінну концентрацію вуглецю по глибині, яка зменшується від поверхні до серцевини деталі. На поверхні деталі концентрація вуглецю після цементації досягає 0,8...1,0 %. Тому в структурі цементованого шару після повільного охолодження можна виділити три зони (рис.10.5): заевтектоїдну, що складається з перліту і цементиту; евтектоїдну, що складається тільки з пластинчастого перліту; і доевтектоїдну, що складається з перліту і фериту з поступовим зменшенням кількості перліту і збільшенням кількості фериту.

Товщина цементованого шару звичайно становить 0,5...1,8 мм. При цьому зі збільшенням температури процесу збільшується товщина шару, яку отримують за певний проміжок часу.

Поверхня деталі

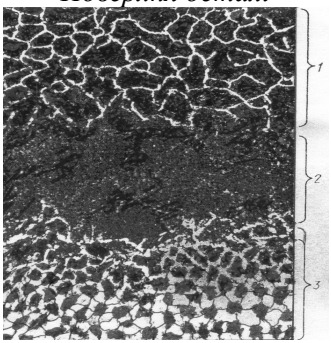

Рис.10.5. Мікроструктура дифузійного шару після цементації низьковуглецевої сталі: 1 – заевтектоїдна зона; 2 – евтектоїдна зона; 3 – доевтектоїдна зона

Для забезпечення максимального опору контактній втомі кількість вуглецю на поверхні може бути підвищена до 1,1...1,2%. Але вища його концентрація викликає погіршення механічних властивостей цементованого виробу.

На практиці найчастіше застосовують два способи цементації: у твердому і газовому карбюризаторі.

Цементація у твердому карбюризаторі. Найбільш розповсюджений твердий карбюризатор складається в основному з деревного вугілля з додаванням вуглекислих солей ($BaCO_3$, Na_2CO_3 та ін.) у кількості 10...40% від маси вугілля.

Деталі укладають у металеві ящики і засипають карбюризатором. Ящики герметизують, замазуючи щілини між кришкою і ящиком вогнетривкою глиною, завантажують у піч і витримують при температурі 930…950 C^0. При цьому у цементаційному ящику відбуваються такі процеси:

1) вуглець деревного вугілля взаємодіє з киснем повітря, що залишився у ящику, за реакцією:

$$2C+O_2 \rightarrow 2CO; \qquad (10.4)$$

2) вуглекислий барій і натрій при нагріванні розкладаються за реакціями:

$$BaCO_3 \rightarrow BaO+CO_2; \quad (10.5)$$
$$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O+CO_2; \quad (10.6)$$

3) вуглекислий газ взаємодіє з вуглецем вугілля, утворюючи оксид вуглецю:

$$CO_2+C \rightarrow 2CO; \quad (10.7)$$

4) оксид вуглецю, який утворився, розкладається у присутності заліза за реакцією:

$$2CO \leftrightarrow CO_2 + C_{am}; \quad (10.8)$$

5) активний атомарний вуглець, який утворюється в результаті реакції (8.7), абсорбується поверхнею деталі:

$$Fe_\gamma+C_{am} \rightarrow Fe_\gamma(C); \quad (10.9)$$

6) розчинений вуглець дифундує вглиб металу, утворюючи дифузійний шар з підвищеним його вмістом .

Вуглекислі солі служать для активізації карбюризатора, прискорюючи швидкість утворення атомарного вуглецю за реакціями (10.5-10.8).

Тривалість цементації твердими карбюризаторами залежить від розмірів ящика та потрібної товщини шару і становить 10...20 год. Після цементації ящики охолоджують на повітрі до 400...500 ^{0}C, потім розкривають.

Газова цементація. Її сутність полягає в тому, що процес здійснюється в печах з герметичною камерою, наповненою газовим карбюризатором. Як цементуючий газ використовують природний газ, пропан-бутанові суміші, рідкі вуглеводні, а також ендогази.

Газова цементація, порівняно з цементацією в твердому карбюризаторі, має переваги, основними з яких є:

1) можливість забезпечення заданої концентрації вуглецю у поверхневому шарі;

2) скорочення тривалості процесу завдяки відсутності в технологічному процесі цементаційних ящиків з малотеплопровідним карбюризатором;

3) можливість повної механізації та автоматизації процесу завдяки спрощенню термічної обробки деталей після цементації (гартування можна проводити безпосередньо з цементаційного нагріву після попереднього підстужування).

При використанні природного газу, основною складовою якого є метан CH_4, атомарний вуглець утворюється при дисоціації метану:

$$CH_4 \rightarrow C_{am} + 2H_2 \,. \qquad (10.10)$$

Процес здійснюють при температурі 910...930 ^{0}C протягом 6...12 год, при цьому одержують цементований шар завтовшки 1,0...1,7 мм.

Кінцеві властивості цементовані деталі отримують у результаті термічної обробки, яку проводять після цементації. Така обробка проводиться для виправлення структури серцевини і цементованого шару після тривалого високотемпературного процесу цементації, отримання високої твердості і стійкості до зношення поверхневого шару та добрих механічних властивостей серцевини деталі. У більшості випадків, особливо при обробці спадково дрібнозернистих сталей, застосовують гартування з температури 820...850 ^{0}C. Така обробка забезпечує подрібнення зерна, повне гартування цементованого шару і часткову перекристалізацію та подрібнення зерна серцевини.

Після газової цементації часто проводять гартування безпосередньо із цементаційної печі після охолодження до 840...860 ^{0}C. Така обробка не виправляє структуру цементованого шару і серцевини, тому її застосовують тільки для виробів, виготовлених із спадково дрібнозернистих сталей.

Інколи термічна обробка після цементації складається з подвійного гартування і відпуску. Перше гартування (або нормалізація) з нагріванням до 880...900 ^{0}C проводять для виправлення структури серцевини, а друге гартування (760...780 ^{0}C) – для усунення перегрівання цементованого шару і надання йому високої твердості та стійкості до зношення. Заключною операцією термічної обробки цементованих виробів є низьке відпускання (160...180 ^{0}C), яке зменшує внутрішні напруги, поліпшує механічні властивості, зберігаючи високі твердість і стійкість до зношення поверхні деталі.

10.2.3.Азотування сталі

Азотуванням називають процес дифузійного насичення поверхневого шару сталі азотом. Вперше був здійснений в 1913 р. М.П. Чижевським.

Азотування проводять для підвищення твердості, стійкості до зношення, границі витривалості і корозійної стійкості стальних виробів. Його перевагами перед цементацією є:

1) вища твердість азотованого шару(до1200HV);

2) вища теплостійкість азотованого шару – його твердість зберігається до 450...500 ^{0}C;

3) вища корозійна стійкість азотованого шару.

Азотування проводять у герметичних камерах при температурі 500...600 ^{0}C, в які з певною швидкістю подається аміак. Аміак при цьому розкладається за реакцією:

$$NH_3 \rightarrow N_{am} + 3/2H_2. \qquad (10.11)$$

Атомарний азот абсорбується поверхнею стальних деталей і дифундує вглиб металу.

У системі *Fe – N* можливо утворення таких фаз:

ε–фаза – твердий розчин азоту на базі нітриду Fe_3N;

γ–фаза – твердий розчин на базі нітриду Fe_4N;

α-азотистий ферит з максимальним вмістом 0,42% *N* при 590 ^0C і 0,01% *N* при 20 ^{0}C;

γ-фаза – азотистий аустеніт, який при температурі 590 ^{0}C розкладається на евтектоїдну суміш $\alpha+\gamma'$.

Структура азотованого шару складається із механічної суміші твердих розчинів на основі нітридів Fe_4N *і* Fe_3N. Під цим шаром розміщується азотистий ферит. При наявності в сталі легуючих елементів азот також утворює нітриди: *CrN,* Cr_2N, Mo_2N, *MnN, TiN, AlN, VN*. Утворення дисперсних нітридів легуючих елементів перешкоджає руху дислокацій і внаслідок цього підвищують твердість азотованого шару. Найбільш сильно підвищують твердість азотованого шару алюміній, хром, молібден, ванадій. Тому, при необхідності забезпечення високої твердості і стійкості до зношення азотованої деталі, для її виготовлення застосовують середньовуглецеву сталь 38Х2МЮА. Одночасна присутність в даній сталі хрому, молібдену і

алюмінію забезпечує твердість після азотування до 1200 *HV*. Молібден також усуває відпускну крихкість, яка може виникати при повільному охолодженні від температури азотування.

Азотування – дуже повільний процес, який триває, звичайно, до 60 год. Для прискорення процесу застосовують ступінчасте азотування, іонне азотування, азотування в рідких середовищах складу 40 % *KCNO* + 60 % *NaCN* (теніфер-процес) тощо.

Азотують циліндри двигунів, насосів, шестерні, копіри верстатів, втулки, клапани двигунів внутрішнього згоряння, матриці і пуансони штампів. Недоліком азотування є крихкість азотованого шару.

10.2.4 Ціанування (нітроцементація) сталі

Ціануванням називають процес дифузійного насичення поверхневого шару стальних деталей одночасно вуглецем і азотом. Ціанування застосовують для підвищення поверхневої твердості, стійкості до зношення і втомленісної міцності стальних деталей, а також корозійної стійкості. Найчастіше ціанування проводять в розплавлених солях, що містять ціанисті солі (наприклад, *NaCN*), і в газовому середовищі, яке містить вуглець і азот. Процес газового ціанування називають ще нітроцементацією.

Рідке ціанування, в залежності від температури процесу, поділяється на низько-, середньо- та високотемпературне.

Низькотемпературне ціанування проводять при низьких температурах (560...600 ^{0}C), що призводить до насичення поверхні деталі переважно азотом. Але цей процес продуктивніший, ніж азотування сталі. Такому ціануванню піддають різальні інструменти з швидкорізальних і високохромистих сталей для підвищення їх стійкості до зношення, що забезпечується утворенням дисперсних нітридів.

Середньотемпературне ціанування проводять в розплавлених солях, що містять ціанистий натрій. Температура процесу 820...860 ^{0}C, а тривалість для отримання шару завтовшки 0,15...0,35 мм. становить 30...90 хв. Процес здійснюють у ваннах з таким складом: 20...25 % *NaCN*, 25...50 % *NaCl*, 25 ... 50 % Na_2CO_3. При ціануванні відбуваються такі хімічні процеси:

$$2NaCN + O_2 \rightarrow 2NaCNO; \quad (10.12)$$

$$2NaCNO + O_2 \rightarrow Na_2CO_3 + CO + 2N_{am}; \quad (10.13)$$

$$2CO \rightarrow CO_2 + C_{am}; \quad (10.14)$$

Атомарні вуглець і азот, що виділяються в результаті цих процесів, абсорбуються поверхнею деталі та дифундують вглиб металу.

Ціанований шар, який отримується при середньотемпературному ціануванні, містить 0,7% *C* і 0,8...1,2 % *N*.

Після ціанування проводять гартування безпосередньо з ціанистої ванни і низьке відпускання з нагрівом до температури 180...200 ^{0}C. Твердість ціанованого шару після цього становить *HRC 58…62*.

Високотемпературне ціанування проводять для отримання шару більшої товщини (0,5...2,0 мм.). Процес здійснюють при 930...950 ^{0}C у ванні складу 8 % *NaCN*, 82 % $BaCl_2$ і 10 % *NaCl*, яку покривають шаром графіту для зменшення теплових втрат і вигорання ціанистих солей. Тривалість процесу - 1,5...6 год.

При такому ціануванні у ванні відбуваються такі реакції:

$$BaCl_2 + 2NaCN \rightarrow 2NaCl + Ba(CN)_2; \quad (10.15)$$

$$Ba(CN)_2 \rightarrow BaCN_2 + C_{am}; \quad (10.16)$$

$$BaCN_2 + O_2 \rightarrow BaO + CO + 2N_{am.}; \quad (10.17)$$

Активні атоми вуглецю та азоту, що утворюються в результаті реакцій, абсорбуються поверхнею деталі та дифундують вглиб металу, утворюючи ціанований шар. Вміст вуглецю на поверхні деталі після обробки становить 0,8...1,2 % , азоту – 0,2...0,3 %.

Після високотемпературного ціанування деталі охолоджують на повітрі, потім піддають гартуванню і низькотемпературному відпусканню.

Ціанування має такі основні переваги над цементацією:

1) менша тривалість процесу;

2) менша деформація і жолоблення деталей складної форми;

3) вища стійкість до зношення і корозії.

Але цей процес має недоліки - високу вартість і отруйність ціанистих солей.

Нітроцементація – це процес дифузійного насичення поверхневого шару стальних деталей одночасно вуглецем і азотом із газоподібного середовища, яке складається з навуглецьовувального газу (80...90 %) і аміаку (20...10 %). Процес проводять при 840...860 ^{0}C протягом 4...10 год. Основне призначення нітроцементації – підви-

щення твердості, стійкості до зношення та границі витривалості стальних виробів.

При одночасному насиченні сталі вуглецем і азотом прискорюється дифузія вуглецю.

Після нітроцементації звичайно проводять гартування безпосередньо з печі та низьке відпускання при 160...180 ^{0}С. Твердість шару після обробки становить 58...60 *HRC* (570...690 *HV*).

Товщина нітроцементованого шару становить 200...800 мкм, але не повинна перевищувати 1000 мкм. Адже при більшій товщині виникають дефекти, які знижують механічні властивості дифузійного шару.

Оптимальний сумарний вміст вуглецю і азоту залежить від марки сталі і становить 1,0...1,65 %, при цьому вміст азоту повинен бути від 0,1 ... 0,15 % до 0,4 ... 0,5%.

Нітроцементації піддають звичайно деталі складної форми, які схильні до жолоблення. Перевагами нітроцементації перед газовою цементацією є:

1) більш низька температура процесу;
2) менші деформації і жолоблення деталей;
3) вищий опір спрацюванню і корозії;
4) менша товщина шару;
5) менша тривалість процесу.

10.2.5 Дифузійне насичення металами (металізація) і неметалами.

Дифузійною металізацією називають процес дифузійного насичення сталі різними металами: алюмінієм, хромом, цинком. Проводять цей процес для отримання високої окалиностійкості, жаростійкості, корозійної стійкості, твердості і стійкості до зношення.

В залежності від стану середовища, в якому відбувається процес, розрізняють такі основні способи дифузійної металізації:

1) занурювання в розплавлений метал;

2) насичення з розплавлених солей, які містять дифундуючий елемент;

3) насичення із сублімованої фази випаровуванням дифундуючого елемента;

4) насичення із газової фази, що складається із галогенних сполук дифундуючого елементу.

Найбільш розповсюдженими різновидами дифузійної металізації є алітування і хромування.

Хромування – це процес насичення поверхневого шару стальних виробів хромом. Хромовані вироби мають високу окалиностійкість (до 800 ^{0}C), корозійну стійкість у прісній і морській воді та азотній кислоті, а сталі з вмістом понад 0,3...0,4 % С – високі твердість та стійкість до зношення.

Дифузійний шар при хромуванні технічного заліза складається з твердого розчину хрому в α-залізі і має невисоку твердість (250...300 *HV*). Шар, отриманий при хромуванні сталі з вмістом понад 0,3 % С, складається з карбідів $(Cr, Fe)_7 C_3$ або $(Cr, Fe)_{23} C_6$ і має високу твердість – 1200...1300 *HV*.

Хромування проводять в температурному інтервалі 1000…1050 ^{0}C у порошкових сумішах, до складу яких входять ферохром (або хром), хлористий амоній та оксид алюмінію. Тривалість хромування при глибіні дифузійного шару 0,2…0,25 мм становить 6…12 год.

Хромування застосовують для деталей паросилового обладнання, пароводяної арматури, клапанів, вентилів, патрубків, а також деталей, що працюють на зношення в агресивних середовищах.

Алітування – це процес насичення поверхні сталі алюмінієм. Його проводять для отримання високої окалиностійкості (до 850..900 ^{0}C), яка забезпечується утворенням на поверхні алітованих виробів щільної плівки оксиду Al_2O_3, котра запобігає окисленню металу. Алітований шар має також високу корозійну стійкість в атмосфері і морській воді.

Структура алітованого шару складається з твердого розчину алюмінію в α-залізі. Концентрація алюмінію на поверхні деталі досягає до 30 %, а товщина шару становить 200...1000 мкм. Твердість алітованого шару досягає до 500 *HV*, але його стійкість до зношення низька. Алітування найчастіше проводять в порошковій суміші з фероалюмінію, хлористого амонію й оксиду алюмінію при температурі в межах 950…1150 ^{0}C протягом 3…12 год. Під час алітування в такій суміші відбуваються наступні процеси:

$$NH_4Cl \rightarrow NH_3 + HCl; \quad (10.18)$$

$$6HCl + 2Al \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2; \quad (10.19)$$

$$Fe + AlCl_3 \rightarrow FeCl_3 + Al; \quad (10.20)$$

Рідинне алітування проводять зануренням деталі у розплавлений алюміній і витримуванням її у ванні протягом 45..90 хв при 750..800 ^{0}С. Товщина алітованого шару при такому режимі становить 200..350 мкм. Алітуванню піддають пальники газогенераторних машин, клапани та інші деталі, що працюють при високих температурах.

Силіціювання – це процес насичення поверхні сталі кремнієм. Воно забезпечує високу корозійну стійкість у морській воді, в азотній, сірчаній і соляній кислотах і дещо підвищує зносостійкість.

Силіційований шар складається з твердого розчину кремнію в α-залізі. Його товщина становить 300...1000 мкм. і він характеризується підвищеною пористістю, низькою твердістю – 200...300 *HV*. Але після попереднього просочення маслом при 170...200 ^{0}С набуває високої стійкості до зношення.

Силіціювання застосовують для обробки деталей у хімічній, паперовій, нафтовій промисловості. Силіціюванню піддають також сплави на основі молібдену.

Борування – це процес дифузійного насичення поверхневого шару сталі бором. Борування проводять для підвищення зносостійкості, твердості, корозійної стійкості, окалиностійкості (до 800 ^{0}С) і теплостійкості.

При боруванні заліза дифузійний шар складається з ромбічного боріду *FeB* і тетрагонального боріду Fe_2B. Під шаром борідів розміщується перехідна зона із твердого розчину бору в α-залізі. При нагріванні боріди стійкі: *FeB* – до 800 ^{0}С, Fe_2B – до 1000 ^{0}С. Хром і марганець при боруванні дифундують у зону борідів, утворюючи складні боріди (*Fe, Mn, Cr)B* і $(Fe, Mn, Cr)_2B$, які мають будову, аналогічну борідам *FeB* і Fe_2B відповідно.

Борідний шар звичайно має товщину 100...200 мкм і характеризується високою твердістю (1800...2000 *HV*) і крихкістю. Висока твердість борідного шару зберігається до 700 ^{0}С, що дозволяє застосовувати борування для підвищення стійкості до зношення деталей, які працюють при високих температурах.

Боровані сталі мають високу корозійну стійкість у водних розчинах соляної, сірчаної і фосфорної кислот, а також стійкі до дії киплячих водних розчинів *NaOH* і *KOH*.

Боруванню піддають втулки нафтових насосів, деталі штампів, прес-форм і машин для лиття під тиском. Стійкість цих деталей після борування зростає у 2...10 рази.