

Тема 3. Термічна та хіміко-термічна обробка

Технологія термічної обробки сталі

Технологія термічної обробки сталі регламентує зміну температури сталі в годині. Процес термічної обробки часто описують графічно у координатах температура – година. З такого графіка можна дізнатися про максимальну температуру нагрівання та про тривалість періодів нагрівання, витримки та охолодження. Технологія термообробки повинна забезпечити високу стабільність заданих властивостей сталі, максимальну продуктивність праці та низьку собівартість продукції.

Основні складові технологічного процесу

Технологія термічної обробки сталі регламентує:

- максимальну температуру нагрівання заготовки t_{\max} ;
- допустиму швидкість нагрівання до температури t_{\max} ;
- годину витримки при температурі нагрівання;
- режим охолодження,

а також належне технологічне обладнання та засоби контролю.

Під час **нагрівання** відбуваються початкові фазові перетворення, продиктовані кінцевою метою термообробки. З огляду на продуктивність процесу **швидкість нагрівання** має бути максимально допустимою. Її вибирають залежно від теплопровідності сталі, форми та розмірів заготовок, що нагріваються, їх розташування біля печі тощо. Що менше у сталі легувальних елементів і простіша конфігурація заготівлі, то більша допустима швидкість нагрівання. Швидке нагрівання зменшує утворення оксидів та знеуглецьовування на поверхні заготівлі, а також затримує ріст зерен аустеніту. Водночас швидке нагрівання збільшує перепад температур у тілі заготовки, а отже, спричиняє неодноразовість фазових перетворень, що може призвести до виникнення значних залишкових напружень. Останні нерідко спричиняють жолоблення заготовок і навіть утворення в них тріщин. Для вуглецевих сталей орієнтовна швидкість нагрівання в печах становить 0,8...1 мм/хв. Нагрівання у соляних ваннах скорочує швидкість нагрівання вдвічі.

Час витримки при температурі нагрівання t_{\max} потрібна, щоб вирівняти температуру в тілі заготовки та закінчити фазові перетворення. Це приблизно 20 % загальної години нагрівання. Точніше годину витримки можна визначити за емпіричними формулами, що їх знайдемо у спеціальній літературі.

Найчастіше нагрівають і витримують заготовки у напівменевих та електричних печах різної конструкції або у соляних ваннах ; рідше для цього використовують установки опору з безпосереднім нагріванням електричним струмом, установки з нагріванням струмами високої частоти, з нагріванням електронними або лазерними лучами та інші.

Газова атмосфера **напівменевих та електричних печей** може призвести до оксидування за наявності O_2 , CO_2 і H_2O , відновлення в CO , H_2 і CH_4 , знеуглецьовування в O_2 , H_2 , CO_2 . У N_2 , інертних газах та вакуумі реакції не відбуваються. Щоб уникнути оксидзації й знеуглецьовування заготовок у соляних ваннах, до розплавлених солей періодично (один-два рази на зміну) додають дезоксидувальні речовини.

Під час охолодження з аустеніту формується нова структура: рівноважна (феритно-перлітна, перлітна чи перлітно-цементитна) або нерівноважна (сорбітна, трооститна чи мартенситна).

До найпоширеніших видів термічної обробки сталі належать: відпал, нормалізація, гартування та відпуск.

Відпал

Відпал — термообробка, під час якої доєвтектоїдну сталь нагрівають до температури $A_{c3} + 30 \dots 50$ °C (рисунок 12 а), евтектоїдну та заєвтектоїдну сталі — до температури $A_{c1} + 30 \dots 50$ °C, витримують при цій температурі і повільно охолоджують (переважно разом із піччю). Надмірне підвищення температури нагрівання порівняно з зазначеним вище призводить до зростання зерен аустеніту та погіршення механічних властивостей сталі.

Вихідними фазами перед нагріванням здебільшого є ферит і цементит. Під час нагрівання та витримки вихідні структури — феритно-перлітна доєвтектоїдної сталі та

перлітна евтектоїдної сталі переходять до аустенітної, а перлітно-цементитної структури заевтектоїдної сталі — до аустенітно-цементитної. Мала швидкість охолодження (30...200 °С/рік) уможливило зворотні дифузійні фазові перетворення, коли аустеніт доевтектоїдної сталі знову переходить у ферит + перліт, а аустеніт евтектоїдної та заевтектоїдної сталі — у перліт. Отже, новоутворені рівноважні структури (або близькі до них) після закінчення відпалу відрізняються від аналогічних за фазовим складом вихідних структур дрібнішими зернами, оскільки останні утворилися із дрібнозернистого аустеніту під час повільного охолодження.

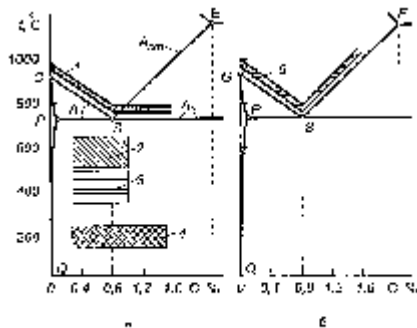


Рис. 1. Частина діаграми системи Fe₂C:

t — температура нагрівання сталі: 1 — під час відпалу та гартування; 2 - під годину високого, 3 - під годину середнього; 4 — під час низького відпустки; 5 — під час нормалізації

Відпал застосовують, щоб усунути нерівноважні структури та залишкові напруження, що виникають під час таких технологічних процесів як лиття, холодна обробка тиском, зварювання. Після відпалення сталь має низьку твердість і міцність, але підвищену пластичність.

Розрізняють **повний** та **неповний** відпал. **Повним** називають відпал з повною перекристалізацією вихідних низькотемпературних фаз, а **неповним** — відпал з повною перекристалізацією однієї фази і частковою перекристалізацією другої. **Повний** відпал застосовують переважно для доевтектоїдних, а неповний - для заевтектоїдних сталей. Під час неповного відпалу заевтектоїдну сталь, як уже зазначено, нагрівають на 30...50 °С вище від A_{c1} так, що в її структурі після нагрівання поруч з аустенітом зберігається вторинне цементування.

Під час **неповного** відпалу із аустеніту можна отримати зернистий (а не пластинчастий) перліт. Відпал на зернистий перліт називають **сфероїдизацією**. Центрами кристалізації в дещо переохоложеному (нижче від A_{c1}) аустеніті є частинки цементиту, що не перейшли у твердий розчин, а також ділянки аустеніту з підвищеною концентрацією вуглецю. Якщо заевтектоїдна сталь була нагріта значно вище від A_{c1} , тобто так, що цементит здебільше перейшов у твердий розчин, а в аустеніті вирівнявся склад, то під час охолодження утвориться не зернистий, а пластинчастий перліт.

Сталь зі зернистим перлітом порівняно зі сталлю з пластинчастим перлітом менш тверда і міцна, але пластичніша. Сталі зі структурою зернистого перліту добре обробляються різанням. Під час гартування вони отримують структуру мартенситу з рівномірно розподіленими в ньому дрібними глобулами цементиту, що підвищує міцність і в'язкість загартованої сталі.

Щоб скоротити тривалість охолодження, нерідко застосовують **ізотермічний відпал**, під час якого заготівлю, нагріту до температури вище від A_{c3} , переохолоджують на 50... 100 °С нижче від A_{c1} і витримують при цій температурі до повного розпаду аустеніту. Далі заготівлю вже можна охолоджувати швидко, наприклад, на повітрі. Ізотермічний відпал застосовують переважно до легованих сталей зі стійким переохолодженим аустенітом. Розпадаючись, аустеніт утворює однорідну двофазову

феритно-карбідну структуру при практично однаковій по всій заготовці температурі. Зазначимо, що температуру контролювати легше, ніж швидкість охолодження.

Нормалізація

Нормалізацією називають нагрівання доєвтектоїдної сталі вище температури A_{C3} (рисунок 12б), евтектоїдної — вище температури A_{C1} і заєвтектоїдної — вище температури A_{Ccm} на 30...50 °С, витримування при цій температурі та охолодження на спокійному повітрі.

Під час нагріву й витримки сталь отримує аустенітну структуру. Швидкість охолодження під час нормалізації вища, ніж під час відпалу, внаслідок чого розпадається аустеніт при більш низьких температурах і утворюється дисперсніша структура евтектоїду (тонкий перліт або сорбіт). Нормалізація зменшує залишкові напруження, усуває сітку вторинного цементиту в заєвтектоїдній сталі, підвищує твердість і міцність. Хоч нормалізація порівняно з відпалом істотно заощаджує час та енергію, все ж вона не завжди може замінити відпал. Відпалені й нормалізовані низьковуглецеві сталі, в яких аустеніт був слабо переохолоджений, мають різні властивості, проте ця різниця поступово збільшується з підвищенням концентрації вуглецю або легувального елемента. Нормалізовані леговані сталі мають значну твердість.

Часто нормалізацію використовують як проміжну термообробку для здрібнення структури перед гартуванням, щоб домогтися стабільніших властивостей мартенситу.

Гартування

Гартування — це вид термообробки, під час якого доєвтектоїдну сталь нагрівають вище температури A_{C3} (рисунок 12а), евтектоїдну й заєвтектоїдну сталі — вище температури A_{C1} на 30...50 °С, витримують при цій температурі і охолоджують зі швидкістю не меншою за критичну.

Критичною окр називають таку мінімальну швидкість охолодження, при якій аустеніт перебудовується тільки в мартенсит.

Під час нагрівання й подальшої витримки в доєвтектоїдній та евтектоїдній сталях формується аустенітна структура, а в заєвтектоїдній — аустенітно-цементитна. Цементит твердіший за мартенсит, тому немає сенсу нагрівати заєвтектоїдні сталі понад температуру A_{Ccr} .

Після гартування доєвтектоїдна та евтектоїдна сталі мають структуру: мартенсит або мартенсит + залишковий аустеніт, а заєвтектоїдна сталь — мартенсит + вторинний цементит + залишковий аустеніт. Метою гартування є істотне підвищення твердості та міцності сталі. Щоб отримати мартенсит з аустеніту, його переохолоджують до температур мартенситного перетворення. Найчастіше для охолодження застосовують воду, водяні розчини лугів і солей, оливу. Найпростіший спосіб охолодження під час гартування — занурити нагріту заготовку у воду або в оливу. Такий спосіб називають **гартуванням в одному охолоднику**.

Потрібно пам'ятати, що під час надто швидкого охолодження виникають значні залишкові напруження, причиною яких є неоднорідний розподіл температури в тілі заготовки та збільшення об'єму металу під час перетворення аустеніту (комірка ГЦК) в мартенсит (комірка ОЦК). Напруження, зумовлені неоднаковими температурами в об'ємі заготовки і, як наслідок, різними величинами термічного стиснення зовнішніх і внутрішніх зон під час охолодження, називають **термічними**. Напруження, спричинені неодноразовістю фазових перетворень у різних точках перерізу заготовки, називають **фазовими**. Термічні й фазові напруження алгебраїчно підсумовуються. Щоб усунути негативний вплив сумарних напружень на жолоблення заготовок та утворення в них тріщин, треба зменшити швидкість охолодження в інтервалі температур мартенситного перетворення. З цією метою заготовки гартують ступінчасто у двох охолодниках.

Гартування у двох охолодниках — спочатку швидко охолоджують у сильному охолоднику (водяні розчини солей або лугів; вода), а пройшовши температурний інтервал 650...400 °С, де стійкість аустеніту мінімальна, охолоджують у слабшому охолоднику, наприклад в оливі. При такому гартуванні, однак, складно визначити момент переносу заготовки з одного охолодника в інший.

Під час **ступінчастого гартування** нагріту заготовку швидко переносять в охолодну рідину, температура якої на 30...50 °С вища від мартенситної точки M_p , і коротко витримують у цій рідині, щоб вирівняти температуру в об'ємі, а потім охолоджують на спокійному повітрі або в холодній оливі. Час ізотермічної витримки не повинен бути більшим за період стійкості аустеніту при температурі витримки. Рідиною для ізотермічної витримки є спеціальні оливи з високою температурою спалаху. Ступінчасто гартують заготовки невеликого перерізу, виготовлені переважно з легованих сталей. Завдяки вирівняній температурі в заготовці значно зменшуються фазові напруження.

Обробка холодом — це додаткове охолодження, яке застосовують для перетворення залишкового аустеніту в мартенсит у високовуглецевих і легованих сталях, для яких температура M_k нижча за 0 °С. Основна мета обробки холодом — стабілізація розмірів і деяке підвищення твердості. Справа в тому, що залишковий аустеніт не стабільний і при коливанні температури він перетворюється у мартенсит, що супроводжується збільшенням розмірів. До виробів, які вимагають обробки холодом, належать точні підшипники кочення, вимірний інструмент тощо. В результаті твердість сталі зростає на 1...4 HRC. Для обробки холодом потрібні температури не нижчі за -80 °С.

Загартовуваність і прогартовуваність сталей

Загартовуваністю називають здатність сталі підвищувати твердість внаслідок гартування. Вона залежить від концентрації вуглецю в сталі. Якщо вміст вуглецю не перевищує 0,2 %, то такі сталі практично не гартуються. Легувальні елементи мало впливають на загартовуваність.

Прогартовуваність — це глибина проникнення загартованої зони від поверхні в тіло виробу. Часто за глибину загартованої зони умовно приймають відстань від поверхні до зони з напівмартенситною структурою (50 % мартенситу + 50 % трооститу).

Глибину загартованої зони можна визначити на зламі, на макрошліфі або за розподілом твердості в перерізі виробу.

На зламі крихка загартована зона має гладку блискучу дрібнозернисту поверхню, натомість незагартована пластична зона — нерівну волокнисту з матовим відтінком. Между між ними добре видно на поверхні зламу.

На протравленому макрошліфі так само добре видно границю між загартованою і незагартованою зонами.

Значна зміна твердості в перерізі виробу відповідає границі між загартованою і незагартованою зонами. Твердість напівмартенситної зони залежить від концентрації вуглецю в сталі й визначається за таблицями або за еталонними графіками, побудованими в координатах: твердість HRC напівмартенситної зони — концентрація вуглецю (%).

Очевидно, що швидкість охолодження найбільша на поверхні виробу, а в його середині — найменша. Виріб не прогартується наскрізь, коли значення фактичної швидкості охолодження в середині виробу менше за критичну швидкість гартування *вкр*. Зі зменшенням критичної швидкості гартування даного матеріалу глибина загартованої зони зростає. Якщо швидкість гартування всередині виробу дорівнює або більша ніж *вкр*, то виріб прогартується наскрізь і всюди має мартенситну структуру. Якщо переріз охолоджуваного виробу настільки великий, що неможливо досягти критичної швидкості навіть на його поверхні, то такий виріб не гартується зовсім. Як уже згадувалось, критична швидкість гартування пов'язана з положенням кривої початку перетворення аустеніту й може бути оцінена за діаграмою ізотермічного розпаду. Для точнішого знаходження значення цієї швидкості необхідно скористатись анізотермічною діаграмою перетворень аустеніту.

До основних факторів, що впливають на стійкість переохолодженого аустеніту, а, отже, і на положення С-кривої, належать: легувальні елементи, частинки, нерозчинені в аустеніті, та розмір його зерна.

Легуючі елементи, крім кобальту, збільшують прогартовуваність, оскільки підвищують стійкість переохолодженого аустеніту, зменшуючи критичну швидкість гартування. Однак стійкість аустеніту підвищується лише тоді, коли легувальні елементи повністю розчиняться в ньому.

Нерозчинені в аустеніті частинки — карбіди або оксиди — зменшують стійкість аустеніту, бо вони стають додатковими центрами кристалізації.

Величина зерна аустеніту істотно впливає на його стійкість через те, що центри кристалізації нових фаз утворюються на границях зерен аустеніту. Зі збільшенням зерна сумарна поверхня границь зменшується і водночас зменшується кількість центрів кристалізації.

Важливою характеристикою прогартовуваності сталі є критичний діаметр заготовки.

Критичним діаметром заготовки D_K називають такий максимальний діаметр циліндра із даної сталі, в центрі якого під час гартування у вибраному охолоднику утворюється напівмартенситна структура. В цьому випадку D_K позначають як D_{50} . Часто напівмартенситна структура не забезпечує потрібних механічних властивостей виробу. Тоді ставлять вимогу, щоб в центрі виробу замість 50 % мартенситу його було, наприклад, 95 % або 99,9 %. У зазначених випадках критичний діаметр позначають як D_{95} або $D_{99,9}$ відповідно. Очевидно, перехід від напівмартенситної структури до переважно мартенситної зменшить D_{Kp} .

Зменшується також D_{Kp} унаслідок заміни охолодника, наприклад, води на оливу. Критичний діаметр враховують під час вибору сталі для виготовлення конкретного виробу. Прогартуваність сталі визначають експериментально за стандартною методикою.

Поверхнєве гартування сталі

Поверхнєве гартування відбувається внаслідок швидкого нагрівання тільки поверхневої зони сталеві заготовки до температур аустенітної області з подальшим охолодженням зі швидкістю, не меншою за критичну. Внутрішня зона (сердце), яка не зазнала фазових перетворень, залишається незагартованою. **Мета поверхневого гартування** — висока твердість поверхні в поєднанні з в'язким серцем, підвищена зносостійкість і межа витривалості.

Поверхню заготовок нагрівають до температур фазових перетворень струмами високої частоти (НВЧ), полум'ям пальників, лазерним лучом, у розплавлених легкоплавких металах або солях та іншими методами.

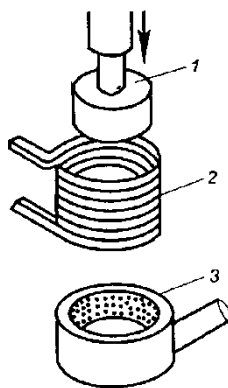


Рис.2. Поверхнєве загартовування струмами високої частоти:

1 - заготовля; 2 - індуктор; 3 - пристрій для охолодження

Для нагрівання **струмами високої частоти** заготовку **1** (рис. 2) вставляють в індуктор **2** (солоніод) з деяким зазором. Кожній заготовці потрібен окремий індуктор відповідно до її форми та розмірів. **Індуктор** — це електропровідна мідна трубка, усередині якої циркулює вода для охолодження. Струм високої частоти створює змінне електромагнітне поле. Воно індуктує в заготовці вихрові струми, які швидко нагрівають її поверхню. Що більша частота струму, то менша глибина його проникнення (глибина нагрівання). Час нагрівання перебуває у межах від 2 до 50 с. Висока швидкість нагрівання зсуває фазові перетворення у зону підвищених температур (див. рис.1) порівняно з повільним нагріванням у печі.

Для живлення індуктора використовують машинні чи лампові генератори. Машинні генератори виробляють струм частотою 500...15 000 Гц, лампові - до 10^7 Гц. Лампові генератори використовують для утворення загартованої кулі завтовшки від 0,1 до 2 мм,

машинні — понад 2 мм. Нагріту заготовку негайно охолоджують біля спеціального пристрою 3, через відверстия якого інтенсивно подається охолодна рідина.

Часто заготовку після нагрівання вкидають у посудину з рідиною.

Перевагами нагрівання НВЧ є висока продуктивність, можливість уникнути окисації й зневуглецювання поверхні заготовки, точно регулювати глибину гартування й автоматизувати процес. **Недоліком** методу є висока вартість генераторів НВЧ, а також необхідність виготовляти окремий індуктор для кожної заготовки та потреба добирати режим обробки. Високочастотне гартування широко застосовують для заготовок, виготовлених з дешевих вуглецевих сталей із вмістом вуглецю понад 0,4 % в умовах серійного та масового виробництва.

Напівменеове поверхнєве нагрівання до температури аустенітної області застосовують переважно для габаритних виробів у одиничному виробництві. Нагрівають поверхні під гартування газокисневими горілками ацетиленом чи природним газом. Слідом за пальником пересувається пристрій із охолоджувальною рідиною. Товщина загартованої зони становить 2...4 мм. Недолік методу полягає в тому, що складно регулювати температуру нагрівання.

Нагрівання лазерним лучом до високих температур тримає всього $10^3 \dots 10^7$ с, після чого від нагрітої поверхневої ділянки малого об'єму дуже швидко відводиться теплота холодним металом і відбувається гартування. Лазери — це квантові генератори світла, енергія якого перетворюється на теплоту. Лазерне випромінювання характеризується вузьким пучком висококонцентрованої енергії, що її випромінюють тверді тіла (рубін, ітрій, скло) або гази (He, Ke, Ag, CO₂). Лазерне випромінювання особливо ефективно для виробів зі складною поверхнею. Товщина зміцненої кулі не перевищує 0,1...0,15 мм.

Нагрівання розплавленими легкоплавкими металами або солями поверхневих куль виробів до аустенітного стану застосовують під час гартування невеликих заготовок простої геометричної форми.

Відпуск

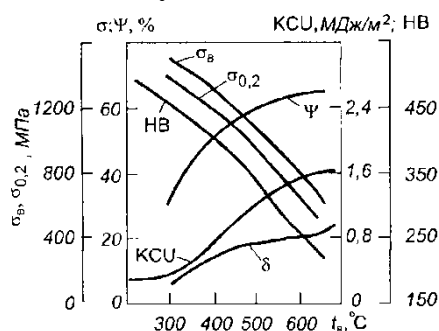


Рис. 3. Залежність механічних властивостей ($\sigma_{0,2}$, σ_b , НВ, δ , ψ , КСУ), загартованої сталі із вмістом вуглецю 0,4 % від температури відпуску t_v

Відпуском називають нагрівання загартованої сталі до температури меншої від A_c , витримування при цій температурі та подальше охолодження. Мета відпуску — зменшення залишкових напружень, зниження твердості та підвищення пластичності сталі. Під час відпуску розпадаються мартенсит гартування та залишковий аустеніт, а також укрупнюються та сфероїдизуються карбіди. Зазначені структурні перетворення змінюють механічні властивості відпущених сталей. З підвищенням температури відпуску t (рисунок 14) міцність ($\sigma_{0,2}$, σ_b) і твердість НВ сталей зменшуються, а їх відносне видовження ψ та ударна в'язкість КСУ зростають.

Залежно від температури нагрівання розрізняють низькотемпературну, середньотемпературну та високотемпературну відпустку.

Низькотемпературний відпуск полягає у нагріванні загартованої сталі до температур 150...250 °C звичайно протягом 1...3 год. В результаті одержують **відпущений мартенсит** і частинно знімають напруження гартування. Пластичність низьковідпущеної сталі дещо зростає, а твердість майже не змінюється. Низькотемпературний відпуск застосовують як кінцеву термообробку для різальних та вимірвальних інструментів, а також

до цементованих та поверхнево загартованих виробів, умови роботи яких вимагають значної поверхневої твердості та високої зносостійкості.

Під час **середньотемпературного** відпуску закалену сталь нагрівають до **350...500 °С**. В межах зазначених температур нагрівання мартенсит гартування та залишковий аустеніт повністю розпадаються на дисперсну феритно-цементитну структуру — **тростить відпуску**. Така структура поєднує високі межі міцності, пружності та витривалості. Твердість сталі після середньотемпературного відпуску становить **10 ..50 HRC**. Цей вид термообробки застосовують для пружин, ресор, а також ударного інструменту.

Високотемпературний відпуск вимагає нагрівання загартованої сталі до температур **500...650 °С** (див. малюнок 12а) та забезпечує повний розпад структур гартування та подальшу коагуляцію продуктів розпаду. Утворена зерниста структура — **сорбіт відпуску** — має високу пластичність та ударну в'язкість при задовільній міцності. Високотемпературну відпустку застосовують для деталей, які сприймають значні ударні та знакозмінні навантаження.

Відпускна крихкість

Відпускнуою крихкістю називають окрихчення багатьох конструкційних сталей у певних діапазонах температур відпуску. Схильність відпущених сталей, особливо легованих, до крихкого руйнування найчастіше виявляють графічно, порівнюючи їх ударну в'язкість КСУ з відповідною температурою відпуску. Звичайно, підвищення температури відпустки збільшує ударну в'язкість. Однак у інтервалі температур відпуску 250...400 °С спостерігається істотний спад значень ударної в'язкості, визначених при кімнатній температурі. У інтервалі температур відпуску 450...600 °С при повільному охолодженні від цих температур ударна в'язкість нижча, ніж при швидкому охолодженні.

Розрізняють два види відпускнуої крихкості — неповторювана (I роду) та повторювана (II роду).

Неповторювана відпускнуа крихкість (I роду) спостерігається у легованих, а також вуглецевих сталях, відпущених у інтервалі температур 250...400 °С. Окрихчення сталей пов'язують з неоднотимним розпадом мартенситу всередині зерна та на його кордонах. Розпад мартенситу в прикордонних зонах починається з виділення та подальшого відокремлення цементиту. У місцях розпаду виникають концентрації напружень і тому ударна в'язкість сталі після відпуску в інтервалі температур 250...400 °С менша, ніж після відпуску при нижчих температурах за 250 °С. Підвищення температури відпуску понад 400 °С або збільшення тривалості нагрівання спричинюють вирівнювання структури у всьому зерні, внаслідок чого відпускнуа крихкість сталі зникає. Повторне (після відпуску понад 400 °С) нагрівання сталі в інтервалі температур окрихчення не зумовлює зниження ударної в'язкості,

Повторювану відпускнуа крихкість (II роду) мають леговані сталі, відпущені в інтервалі температур 450...600 °С та охолоджені повільно. Швидке охолодження у воді від температури високого відпуску зменшує спад ударної в'язкості аж до повного його зникнення. Повторювана відпускнуа крихкість не спостерігається у вуглецевих сталях, її найчастіше пов'язують із виділенням на межах колишніх зерен аустеніту шкідливих домішок, особливо фосфору, під час повільного охолодження після високотемпературного відпуску. Цьому сприяють такі широко використовувані легувальні елементи, як хром, марганець та нікель, які також мігрують до меж зерен, де хром та марганець утворюють леговані та спеціальні карбіди.

Підвищена концентрація шкідливих домішок поблизу меж зерен суттєво послаблює міжзеренний зв'язок і є однією з причин крихкості. Додавання до легованих сталей в обмеженій кількості молібдену (0,2...0,3 %) або вольфраму (0,5...0,7 %) послаблює відпускнуа крихкість. Нагрівання попередньо окрихненої сталі до температур понад 600 °С і подальше швидке охолодження можуть обмежити або зовсім зняти відпускнуа крихкість. Під час цього розподіл фосфору по зерну вирівнюється, а швидке охолодження стримує дифузію. Проте повторна відпустка при температурах 450...600 °С знову призводить до відпускнуої крихкості. Звідси виглядатиме назва — повторювана відпускнуа крихкість.

Особливості термічної обробки легованої сталі

Для легованої сталі застосовують ті ж види термічної обробки, що і для вуглецевої сталі. Відмінність термічної обробки легованої сталі від вуглецевої полягає у **виборі температур і швидкості нагріву**, тривалості витримки при цих температурах і способі охолодження.

Нагрівання легованих сталей при термічній обробці повинен бути повільнішим, ніж для вуглецевих сталей, у зв'язку із зниженою теплопровідністю легованих сталей і можливістю розтріскування при швидкому нагріванні.

Особливо обережно треба нагрівати деталі зі сталі, що містить такі елементи, як вольфрам, який володіє низькою теплопровідністю.

Вибір температури термічної обробки, як вже відомо, проводиться залежно від критичних точок сталі.

Всі легуючі елементи можна розбити на дві групи:

Група-1: елементи, що підвищують критичні точки AC_1 і AC_3 , а отже, і температури нагрівання при термічній обробці, відпалу, нормалізації і загартуванню, і легуючі елементи, що знижують критичні точки.

До першої групи належать хром (Cr), ванадій (V), вольфрам (W), кремній (Si) і ін У зв'язку з цим відпал, нормалізація і загартування сталей, що містять перераховані елементи, виробляються при більш високих температурах, ніж вуглецевих сталей.

Група-2: до другої групи елементів належать марганець (Mn), нікель (Ni) і ін

Крім критичних точок, при виборі температури термічної обробки звертають увагу на схильність аустенітного зерна до зростання.

Якщо сталь схильна до зростання аустенітного зерна, то щоб уникнути отримання грубозернистої структури температура термічної обробки вибирається як можна ближче до критичної точки сталі.

Проте це ускладнює більш повне розчинення легованих карбідів в аустеніті і отримання після гартування легованого мартенситу, який володіє кращими властивостями.

Всі легуючі елементи, за винятком Mn, перешкоджають росту аустенітного зерна при нагріванні.

Особливо сильний вплив на зменшення росту аустенітного зерна надають елементи, що утворюють в сталях карбіди (хімічні сполуки з вуглецем — Cr, W, V).

Карбіди розташовуються по границях зерна і ускладнюють його зростання при нагріванні.

Таким чином, **леговані сталі** (за винятком марганцевистих сталей) **при термічній обробці не схильні до перегріву і нагрівання їх може проводитися до більш високих температур, ніж для вуглецевих сталей.**

Час витримки при термічній обробці легованих сталей встановлюється дещо більше, ніж для вуглецевих сталей, так як легована сталь має гіршу теплопровідність, ніж вуглецева, і для повного прогріву деталі потрібно більше часу.

Крім цього, для отримання кращих механічних властивостей необхідна витримка для більш повного розчинення легованих карбідів в аустеніті.

Швидкість охолодження при термічній обробці встановлюється, як вже відомо, у відповідності з величиною критичної швидкості гарту.

Всі легуючі елементи, крім кобальту (Co), зменшують критичну швидкість загартування.

Практично це призводить до того, що велика частина легованих сталей гартується на мартенсит в маслі, тобто при меншій швидкості охолодження, ніж вуглецева сталь.

Деякі високолеговані сталі здатні гартуватися навіть на повітрі.

Легована сталь володіє більшою прогартовуваністю, чим вуглецева.

Серед легованих сталей є такі, які прогартовуються наскрізь навіть у великих перетинах.

Всі легуючі елементи, крім Al і Z, збільшують кількість залишкового аустеніту в сталі після загартування.

При вмісті у великій кількості таких елементів, як Ni, Mn, аустеніт в сталі при кімнатній температурі може зберігатися скільки завгодно.

Наявність легуючих елементів в сталі вносить деякі зміни в практику проведення відпустки.

Карбідоутворюючі елементи (вольфрам, ванадій, хром) сприяють утворенню стійкого проти розпаду, тобто червоностійкого мартенситу.

Завдяки цьому висока твердість сталі зберігається до температур 450-550°, в той час як в вуглецевої сталі мартенсит починає розпадатися з температури 200-250°, що викликає зниження твердості сталі.

Висока червоностійкість є дуже цінною властивістю для інструментальної сталі. Інструмент в процесі різання нагрівається, і якщо сталь не червоностійка, то вона втрачає свою твердість і ріжучі властивості. Тому вольфрам, ванадій, хром широко використовують в інструментальних сталях.

Розпад мартенситу в таких сталях при 450-550° супроводжується виділенням легованих карбідів, що викликають уповільнення падіння твердості, а іноді і збільшення її.

Лише при температурах 650—700°, коли леговані карбіди сильно збільшуються в розмірах, відбувається зниження твердості і міцності. Збільшення твердості в межах температур 450-550° за рахунок виділення карбідів називається вторинної твердістю.

Легований залишковий аустеніт володіє великою стійкістю, і перетворення його в мартенсит відбувається при значно більш високих температурах відпуску, ніж у вуглецевої сталі.

Так, у швидкорізальної сталі, легової хромом, вольфрамом, ванадієм, перетворення залишкового аустеніту відбувається лише при температурі відпустки 550-575°.

Це перетворення полягає в частковому виділенні легуючих елементів у вигляді карбідів під час витримки при відпустці та у перетворенні збідненого залишкового аустеніту в мартенсит при охолодженні на повітрі.

Таке перетворення викликає підвищення твердості і називається вторинної загартуванням сталі.

Крім перерахованих явищ, що відбуваються при відпустці легованих сталей, спостерігається інший, порівняно з вуглецевою сталлю, характер зміни ударної в'язкості залежно від температури відпустки.

У вуглецевих сталях ударна в'язкість з підвищенням температури відпуску безперервно зростає, аж до температури 600-650°.

У деяких легованих сталях після відпустки в інтервалі температур 270-400° і 500-600° спостерігається різке зниження ударної в'язкості.

До теперішнього часу немає способу усунення крихкості в інтервалі 270-400° і тому цей вид називають крихкості непереборний відпускну крихкістю, або відпускну крихкістю першого роду.

Крихкість в інтервалі 500-550° називається відпускну крихкістю другого роду, вона може бути усунута швидким охолодженням після відпустки.

Хіміко-термічна обробка сталі

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають процес зміни хімічного складу, мікроструктури та властивостей поверхневого шару заготовки.

Для зміни хімічного складу заготовку нагрівають у середовищі, збагаченому **дифузантом** (елементом, який насичує), витримують протягом певного часу при заданій температурі, а потім охолоджують. Під час цього відбувається дифузійне збагачення поверхневого шару заготовок неметалами або металами з метою поверхневого зміцнення. ХТО складається із трьох елементарних процесів — **дисоціації, адсорбції та дифузії**.

Дисоціація — розпад молекул вихідної речовини з утворенням активних атомів дифузанту. Його може виділяти газоподібне, рідке або тверде середовище.

Адсорбція — захоплення поверхнею тіла активних атомів дифузанту. Притягання забезпечують атоми основного металу, що перебувають на поверхні заготовки й мають зовнішні вільні зв'язки. З підвищенням температури адсорбційна здатність металу зростає. Розвиткові адсорбції сприяє здатність дифузанту утворювати з основним металом заготовки твердий розчин або хімічну сполуку.

Дифузія — переміщення адсорбованих поверхнею атомів дифузанта в глибину тіла. В результаті утворюється **дифузійний шар**, що відрізняється від основного металу хімічним складом, структурою та властивостями. Товщина дифузійного шару залежить від температури та тривалості процесу, виду утворюваного твердого розчину й концентрації дифузанта на поверхні заготовки. З підвищенням температури й часу витримки (як основних параметрів процесу) товщина дифузійного шару зростає. З утворенням твердих розчинів проникнення (вуглець, азот), швидкість дифузії вища, ніж у випадку твердих розчинів заміщення (алюміній, хром, кремній). Тому під час насичення сталі металами застосовують вищі температури й збільшують тривалість процесу. Зі збільшенням поверхневої концентрації дифузанта при незмінній температурі й тривалості процесу росте товщина дифузійного шару. Границі зерен, де завжди є дефекти кристалічної будови, полегшують дифузію, особливо тоді, коли дифузанти утворюють з атомами основного металу обмежені тверді розчини.

ХТО змінює хімічний склад і структуру поверхневого шару, тоді як поверхневе гартування — лише структуру. Тому різниця у властивостях поверхні й осердя в деталях після хіміко-термічної обробки більша, ніж у поверхнево загартованих деталях. Результати ХТО не залежать від форми деталей, чого не можна сказати про результати гартування СВЧ. Проте поверхневе гартування продуктивніше.

До найпоширеніших способів ХТО належать цементация, азотування, ціанування, нітроцементация, алітування, силіціювання та інші.

Цементация сталі

Цементацию називають процес дифузійного насичення вуглецем поверхневого шару сталевих заготовок. Мета цементации в комплексі з подальшою термообробкою — надати поверхні деталі високої твердості та зносостійкості, зберігши в'язке осердя. Як правило, цементують сталі з низькою масовою часткою вуглецю в межах від 0,1 до 0,25 % . Перед цементацию заготовки попередньо обробляють різанням, залишивши припуск (0,05...0,1 мм) на шліфування.

Після ХТО концентрація вуглецю найвища на поверхні заготовки (0,8...1,0 %), поступово зменшується в глибину до осердя, доходячи до вихідної концентрації в сталі. За повільного охолодження у дифузійному шарі заготовки формуються три структурні зони: зовнішня заевтектоїдна ($C > 0,8$ %) з перлітно-цементитною структурою, середня евтектоїдна ($C = 0,8$ %) з перлітною і внутрішньої, що межує з осердям, — доевтектоїдна ($C < 0,8$ %) з феритно-перлітною структурою.

Ефективною глибиною цементации умовно називають відстань від поверхні до точки внутрішньої зони, біля якої в структурі маємо співвідношення фериту й перліту як 1:1. Очевидно, що ефективна глибина цементации менша від повної її глибини. Значення ефективною глибини лежить в інтервалі від 0,5 до 2 мм. Всі зазначені вище структури грубозернисті через тривалу витримку заготовок при високій температурі.

У заводській практиці застосовують два види цементации — у твердому й газовому насичувачі (карбюризаторі).

Для **цементации у твердому карбюризаторі** укладають заготовки з певними проміжками в металеву скриньку, на дно якої насипають шар карбюризатора (суміш дрібних шматочків деревного вугілля з 20...25 % $BaCO_3$ і 3...5 % Na_2CO_3). Сіль Na_2CO_3 запобігає спіканню карбюризатора. Перший ряд заготовок пересипають карбюризатором, після чого кладуть другий ряд, знову пересипають карбюризатором і так, поки не наповнять скриньку. Останній ряд заготовок теж покривають карбюризатором. Скриньку накривають покривкою, замащують всі щілини вогнетривкою глиною, щоб не допустити виходу газів, і в печі нагрівають до температури 910...930 °С. Тут вугілля взаємодіє з киснем повітря, що залишився у скриньці: $2C + O_2 \rightarrow 2CO$.

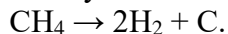
Оскільки ферит практично не розчиняє вуглецю, а аустеніт розчиняє до 2,14 % С, то температура цементации повинна перевищувати точку A_{C3}

Поверхневий шар глибиною в 1 мм утворюється у твердому карбюризаторі протягом 8... 10 год.

Отже, цементация у твердому карбюризаторі малопродуктивна через низьку теплопровідність скриньки з карбюризатором. Тому цей спосіб цементации застосовують лише в дрібносерійному виробництві.

Газова цементация заготовок здійснюється у герметичному просторі печі, наповненому газовим карбюризатором. Як карбюризатори застосовують **природний газ**, що складається переважно з CH_4 , **контрольовану атмосферу**, яку отримують поза піччю в спеціальному генераторі, та штучний газ, утворений з рідких вуглеводнів (гас, бензол та ін.), які подають краплями в піч, де вони виділяють переважно CH_4 , CO і H_2 .

Метан природного газу розпадається у печі з виділенням атомарного Карбону:



Знаючи хімічний склад сталі й регулюючи склад газової суміші, можна керувати насиченням заготовок вуглецем, а також легко автоматизувати процес. Він менш тривалий порівняно з цементацией у твердому карбюризаторі. Тому газову цементацию застосовують у великосерійному й масовому виробництвах.

Після цементации здійснюють **термічну обробку заготовок** — гартування й низькотемпературний відпуск з метою отримання заданих механічних властивостей. Режим термообробки залежить від умов експлуатації цементованої деталі та марки сталі, з якої ця деталь виготовлена. Маловідповідальні деталі одноразово гартують від температури цементации з подальшим низькотемпературним відпуском або перед гартуванням охолоджують на повітрі від температури цементации до температури $840\text{...}860$ °С. Охолодження зменшує залишкові напруження й жолоблення заготовок. Під час гартування отримують грубоголчастий мартенсит. Вибір спадково дрібнозернистої сталі для виготовлення деталей дає змогу обмежити ріст аустенітного зерна під час цементации й отримати бажану структуру навіть в результаті одноразового гартування.

Коли потрібна висока поверхнева твердість, міцність і ударна в'язкість, термообробкою формують дрібнозернисту структуру і на поверхні деталі, і в осерді, застосовуючи подвійне гартування і низькотемпературний відпуск.

Для першого гартування заготовку, охолоджену після цементации на повітрі, нагрівають на $30\text{...}50$ °С вище від температури цементованої сталі, тобто до $850\text{...}900$ °С. Тоді метал повністю перекристалізовується, утворюючи дрібнозернистий аустеніт. Під час цього в аустеніті поверхневого насиченого шару розчиняється сітка цементиту. Продукти розпаду аустеніту мають теж дрібнозернисту структуру.

Під час **другого гартування** формується структура поверхневого шару, де вміст $\text{C} \geq 0,8\%$. З огляду на це температура гартування повинна перевищувати критичну точку A_{c1} на $30\text{...}50$ °С і становити $760\text{...}780$ °С. Під час нагрівання мартенсит, що утворився в поверхневому шарі при першому гартуванні, розпадається, виділяючи глобулярні карбіди. При температурі нижче $A_{c_{ст}}$ ці карбіди лише частково розчиняються в аустеніті, а нерозчинені карбіди залишаються у загартованій зовнішній заевтектонічній зоні поверхневого шару, збільшуючи його твердість.

Низькотемпературний відпуск зменшує залишкові напруження й мало що знижує твердість поверхневого шару. Поверхневий шар після подвійного гартування й низькотемпературного відпуску має структуру відпущеного дрібноголчастого мартенситу з вкрапленням карбідів глобулярної форми. Ця структура характеризується підвищеною зносостійкістю. У деталях з вуглецевої сталі осердя має дрібнозернисту структуру, близьку до сорбітної. Перехід до легованих сталей збільшує прогартованість заготовок й сприяє утворенню в осерді, залежно від кількості легувальних елементів й перерізу заготовки, трооститної, бейнітної структури або структури низьковуглецевого мартенситу. З огляду на низький вміст вуглецю осердя вуглецевих, як і легованих сталей, зберігає високу ударну в'язкість.

У поверхневому шарі легованих сталей після термообробки може бути залишковий аустеніт, який знижує твердість. Щоб усунути аустеніт, іноді застосовують обробку холодом, що призводить до зменшення ударної в'язкості.

Цементовані сталі після гартування мають у поверхневому шарі великі напруження стиску, які підвищують границю витривалості.

Азотування сталі

Азотуванням називають дифузійне насичення азотом поверхневої кулі сталевих деталей. Мета азотування – істотно підвищити твердість, зносостійкість, межу витривалості та корозійну тривкість.

Деталі азотують після повної механічної та термічної обробки в атмосфері аміаку, який подається з балонів у герметичні реторти, де укладені деталі. Реторти нагрівають у печах переважно до температури 500...600°C протягом 24...60 років і довше. В результаті поверхнева куля насичується азотом на глибину 0,3...0,6 мм. Переходити до вищих температур не завжди доцільно, бо коагулюють нітриди, що знижує твердість азотованої кулі. Аміак під дією нагрівання розкладається на поверхні деталей на атомарний **Нітроген** і **Гідроген**. Атомарний Нітроген адсорбується поверхнею деталі, дифундує в її глибину та утворює нітриди. Нітриди заліза не забезпечують високої твердості поверхневої кулі. Тому азотування вуглецевих сталей не дає належного ефекту. Лише легувальні елементи — хром, молібден, ванадій, титан утворюють дисперсні, тверді та термічно тривкі нітриди, що надають дуже високої поверхневої твердості спеціальним комплексно легованим сталям — **нітраляям**. Хром, ванадій та алюміній у сталі 38Х2МЮА дають змогу отримати внаслідок азотування твердість до 1200 HV. Крім цього, азотують також сталі 38Х2Ю, 35ХМА, 30ХГТ, що містять хром, марганець, титан, та 36ХНТМФА з вмістом хрому, нікелю, молібдену, ванадію.

Азотована куля, сформована під час насичення, не вимагає додаткової термічної обробки як у випадку цементації. Глибина азотованої кулі залежить від температури та тривалості процесу, а також від хімічного складу сталі. Зі збільшенням температури й тривалості азотування глибина азотованої кулі зростає. Зважаючи на порівняно низьку температуру процесу, швидкість азотування на порядок менша за швидкість цементації. Збільшення сумарної масової частки легувальних елементів спричинює зменшення глибини азотованої кулі.

Існує дві різновиди азотування — для підвищення поверхневої твердості та зносостійкості та для підвищення корозійної тривкості.

Щоб **підвищити** поверхневу твердість і зносостійкість, процес проводять одноступінчасто при температурі 500...520 °С, а для пришвидшення процесу іноді вдаються до двоступінчастого азотування — спочатку при температурі 500...520 °С, а потім при 560...600 °С. З, що скорочує тривалість процесу без помітного зменшення твердості.

Осердя азотованих деталей повинна мати підвищену міцність і пластичність, з огляду на що їх попередньо гартують і відпускають при температурі 600...675 С, вищій за температуру азотування. Тому структура сорбіту, що утворилася в процесі термообробки, не змінюється під час азотування. Заготовки зі структурою сорбіту можна обробляти лезовим інструментом і наприкінці шліфувати. Підвищена міцність серцевини запобігає проламуванню тонкої та крихкої азотованої кулі під дією високого тиску. В азотованій кулі з'являються високі залишкові стискальні напруження, що підвищує межу витривалості і гладких, і надрізаних деталей. Азотування застосовують рідше, ніж цементацію, для таких відповідальних виробів як вимірний інструмент, гільзи циліндрів двигунів та насосів, зубчасті колеса, колінчасті вали, прес-форми для лиття під тиском, штампи.

Щоб підвищити корозійну стійкість, леговані та вуглецеві сталі азотують при температурі 650...700 °С. Висока температура дозволяє скоротити процес до декількох годин. Тут не потрібна велика глибина азотування, а твердість не має істотного значення.

Переваги азотування порівняно з цементацією:

- Вища твердість і зносостійкість поверхневої кулі;
- перелічені властивості зберігаються до температур 450...500 °С проти 200...225 °С у разі цементації.

Недоліки:

- Значна тривалість процесу;
- Висока вартість застосовуваних для азотування легованих сталей - нітраляїв.

Ціанування і нітроцементация

Ціанування — це одночасне дифузійне насичення вуглецем і азотом поверхневого шару сталевих деталей (заготовок) у розплавленій ціанистій солі, а **нітроцементация** —

насичення їх в газовому середовищі. Мета ціанування й нітроцементациї — підвищення твердості, зносостійкості та втомної міцності деталей.

Одночасне насичення вуглецем і азотом відбувається швидше, ніж послідовне насичення кожним з цих елементів окремо. Співвідношення вуглецю й азоту в насичуваному шарі регулюють, змінюючи склад середовища й температуру процесу. Що нижча температура, то більше насичення поверхневого шару азотом і менше вуглецем.

Розрізняють ціанування низькотемпературне (540...560 °С), що за результатами наближається до азотування, і високотемпературне (820...950 °С), що наближається до цементациї.

Під час **низькотемпературного ціанування** поверхневий шар насичується переважно азотом. Низькотемпературне ціанування виконують після гартування і високотемпературного відпуску виробів. Такими виробами можуть бути загострені інструменти із швидкорізальних сталей для випадків, що вимагають підвищення зносостійкості та теплостійкості. Протягом 0,5...3 год насичення на поверхні інструменту виникає карбонітридний шар завтовшки 0,01...0,03 мм з твердістю за Віккерсом до 1 000 НУ.

Високотемпературне ціанування супроводжується насиченням сталі переважно вуглецем (до 0,6...1,2 %) і меншою мірою азотом (0,2...0,6 %). Товщина поверхневого насиченого шару становить 0,15...2,0 мм. Деталі після високотемпературного ціанування гартують з подальшим низькотемпературним відпуском. Якщо температура ванни з ціанистою сіллю не перевищувала 850 °С, то гартують відразу з ванни, а в протилежному випадку деталі перед гартуванням охолоджують. Під час насичення й термообробки формується мікроструктура зміцненого шару: на поверхні є тонкий шар карбонітридів $Fe_2(C,N)$, $Fe_3(C,N)$, а під ними — азотистий мартенсит. Твердість за Роквеллом зміцненого шару 58...62 HRC. При температурі 820...860 °С протягом 1 год отримують поверхневий шар завтовшки близько 0,3 мм. За однакової твердості з цементованим ціановий шар зносостійкіший. Ціанування порівняно з цементациєю характеризується меншим жолобленням деталей складної форми і меншою тривалістю.

Недоліком ціанування є висока вартість ціанистих солей і їх отруйність, що вимагає спеціальних заходів для охорони праці й довкілля. Перелічених недоліків позбавлена нітроцементация.

Нітроцементацию здійснюють у суміші газу, яким науглецьовують, й аміаку при температурі 850...870 °С протягом 2... 10 год. Ї широко застосовують в автомобільній промисловості для поверхневого зміцнення зубчастих коліс і валів, виготовлених із хромистих і хромомарганцевих сталей. Після насичення деталі гартують і піддають низькотемпературному відпуску. Коли багато залишкового аустеніту, деталі після гартування обробляють холодом. Порівняно з ціануванням нітроцементация дешевша й безпечніша.

Ціанування відбувається у ванні з розплавленою ціанистою сіллю.

Дифузійна металізація

Дифузійна металізація — дифузійне насичення поверхневих шарів переважно сталевих виробів різними металами за високої температури. Дифузійна металізація зумовлює підвищення корозійної тривкості, жаро- та зносостійкості.

Метали утворюють із залізом тверді розчини заміщення і тому повільніше за неметали дифундують у глибину виробу. Щоб скоротити тривалість насичення металами, процес проводять за підвищених температур.

Дифузійну металізацію виконують у твердому, рідкому та газоподібному дифузантах.

У разі використання твердого дифузанта виробу пакують у контейнер, куди додають порошок із дифузанта або його ферросплаву, нейтральний порошок (глинозем, шамот), що запобігає спіканню, та хлористий амоній NH_4Cl . Під час нагрівання у контейнері відбуваються реакції розпаду NH_4Cl з виділенням HCl . Останній утворює з дифузантом газоподібний хлорид, який виділяє на поверхні виробу атоми металу.

Зупинимося на металізації алюмінієм та хромом.

Дифузійне насичення виробів алюмінієм з метою підвищення жаростійкості називають **алітуванням**. Алітують сталі з 0,1...0,2 % Zn найчастіше в порошковій суміші з фероалюмінію, хлористого амонію та оксиду алюмінію при температурі 950... 1150 °С

протягом 3...12 год. В результаті утворюється дифузійна куля завтовшки 0,2...0,5 мм. За наявності кислорода на поверхні алітованого виробу формується щільна плівка оксиду алюмінію Al_2O_3 , яка захищає виріб від взаємодії зі середою до температури 900 °С.

Під час рідинного алітування вироби занурюють у розплавлений алюміній і витримують там протягом 45...90 хв при температурі 750...800 °С. В результаті отримують дифузійну кулю завтовшки 0,2...0,35 мм. Алітують чохлі термодар, клапани та інші деталі, що працюють при підвищених температурах.

Хромування — дифузійне насичення хромом поверхонь переважно сталевих виробів з метою підвищення до 800 °С жаростійкості, корозійної тривкості (у воді, морській воді та азотній кислоті) та поверхневої твердості. Хромують при температурі 1000...1050 °С протягом 6...12 год. Глибина дифузійної кулі 0,2...0,25 мм. Найчастіше насичують у порошкових сумішах із ферохрому (або хрому), хлористого аммонію та оксиду алюмінію. Постачальником активних атомів Алюмінію до насичуваної поверхні є газ — хлорид алюмінію $AlCl_3$. Підвищенню поверхневої твердості до 1200...1300 НV сприяє вуглець у сталі в кількості понад 0,3 %.