

Технологічні процеси термічної обробки сталі

Процеси термічної обробки характеризуються не лише температурою і тривалістю нагріву, швидкістю нагріву і охолодження, загальною тривалістю виробничого циклу. Вид термічної обробки перш за все визначає тип фазових і структурних змін у металі. Виходячи з цього, О. Бочвар розробив класифікацію, яка охоплює численні різновиди термічної обробки чорних і кольорових металів і сплавів. На основі класифікації О. Бочвара комісією зі стандартизації Ради Економічної Взаємодопомоги створено класифікацію видів і різновидів термообробки сталей і кольорових металів і сплавів, а також відпорну термінологію.

Згідно чинній класифікації види термічної обробки поділяють на:

- власне термічну (ТО);
- хіміко-термічну (ХТО);
- термомеханічну (ТМО).

Власне термічна обробка охоплює технологічні процеси: відпал першого роду, відпал другого роду, гартування з поліморфним перетворенням, гартування без поліморфного перетворення, відпуск, старіння. Кожен з цих видів термообробки поділяється також на різновиди, виходячи із специфіки сплавів. Вона зводиться лише до термічного впливу на метал або сплав.

Хіміко-термічна обробка поєднує в собі операції термічного і хімічного впливу з метою зміни хімічного складу, структури та властивостей поверхневого шару металу або сплаву. Різновиди хіміко-термічної обробки: цементація, азотування, нітроцементація, борування, дифузійна металізація тощо.

Термомеханічна обробка об'єднує в одному технологічному процесі операції термічного впливу і пластичної деформації у різній послідовності. Різновиди термомеханічної обробки - високотемпературна (ВТМО), низькотемпературна (НТМО), ізоформінг тощо.

Відпал

Відпал першого роду частково або повністю усуває відхилення від рівноважного стану металу, які виникли внаслідок його попередньої обробки (лиття, обробка тиском, зварювання, термообробка). Під час відпалу першого роду фазові перетворення не відбуваються. Якщо ж вони все таки мають місце, то на властивості сталі істотно не впливають. Процеси, які усувають відхилення від рівноважного стану, здійснюються самодовільне, і нагрівання при відпалі першого роду здійснюють лише для їхнього прискорення. Основні параметри такого відпалу – температура і тривалість нагріву, швидкість нагрівання і охолодження мають другорядне значення. Залежно від того, які відхилення від рівноважного стану усуваються, розрізняють такі різновиди відпалу першого роду.

Рекристалізаційний відпал використовують для зменшення твердості наклепаної холоднодеформованої сталі, підвищення її в'язкості, одержання певного розміру зерна. Сталь для цього нагрівають до температури початку рекристалізації, витримують 3 - 6 год і повільно охолоджують до 500 °С і далі на повітрі. В результаті замість структури деформованого металу утворюється рівноважна дрібнозерниста, вільна від залишкових напружень структура.

Гомогенізуючий (дифузійний) відпал застосовують для вирівнювання хімічного складу та підвищення однорідності структури литої легованої сталі або для зниження схильності прокату до утворення флокенів і шиферності. Внаслідок цього утворюється однорідна структура з великим зерном, яке подрібнюють під час наступної термічної обробки або при прокатуванні. Відпал на велике зерно застосовують для поліпшення

оброблюваності сталі різанням. Оскільки структури з більшим зерном обробляються легше, штучно розмір мало вуглецевої сталі збільшують нагрівом до 950 - 1100 °C і повільним охолодженням її разом з піччю.

Відпал другого роду базується на використанні дифузійних (нормальних) фазових перетворень при охолодженні металів і сплавів. Принципову можливість застосування до сплаву відпалу другого роду можна визначити за діаграмою стану. Його проводять для сталей і сплавів, які мають поліморфні, евтектоїдні або перектоїдні перетворення, а також у разі перемінної розчинності у твердому стані. Практично доцільність відпалу другого роду визначає те, наскільки структурні зміни впливають на властивості сплаву. Відпал може бути здійснений з повними або частковими змінами фазового складу.

Залежно від змін, що відбуваються у фазово-структурному стані, відпал може бути:

- повним;
- неповним;
- сфероїдизуючим;
- ізотермічним.

Повний відпал застосовують для зменшення твердості, внутрішніх напружень, структурної неоднорідності, подрібнення зерна, підвищення в'язкості й пластичності, поліпшення оброблюваності сталі.

Неповний відпал використовують для зменшення твердості та покращання оброблюваності сталей різанням. При цьому відбувається перекристалізація лише перлітної складової структури. Після нагрівання до температури на 40 - 60 °C, витримання і повільного охолодження утворюються перліт і ферит у доевтектоїдних сталях та перліт і цементит у заевтектоїдних. Для заевтектоїдних сталей неповний відпал використовують замість повного.

Сфероїдизуючий відпал (сфероїдизація карбідів) застосовують для зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням високовуглецевих та інструментальних сталей, підвищення пластичності мало- і середньовуглецевих сталей перед холодним штампуванням і волочінням. Режим такого відпалу включає нагрівання, повільне охолодження (30 - 40 °C/год) до 600 °C і далі на повітрі або циклічне багаторазове нагрівання. За цих умов відбувається усунення пластинчастого і змішаного перліту та цементитної сітки, утворюється кінцева структура фериту та зернистого цементиту.

Ізотермічний відпал використовують для скорочення тривалості відпалювання прокату або заготовок після кування з легованих сталей. Здійснюють його нагріванням на 30 - 50 °C. Далі прискорено охолоджують до температури найменшої стабільності аустеніту (650 - 680 °C) та витримують ізотермічно до повного розпаду аустеніту з подальшим охолодженням на повітрі. При цьому спочатку утворюється аустеніт, а потім відбувається його ізотермічний розпад на ферито-карбідну суміш. Кінцева структура після ізотермічного відпалювання – пластинчастий перліт і ферит, а в заевтектоїдних сталях – перліт і цементит.

Нормалізаційний відпал (нормалізація) є ефективним засобом усунення грубозернистої структури після лиття і кування. Для низько вуглецевих сталей використовують замість повного відпалу. Виливки середньовуглецевих сталей нормалізують замість гартування для зменшення короблення та тріщиноутворення. Нормалізацію з високим відпуском замість повного відпалу використовують для виправлення структури легованих сталей. При нормалізації отримують дрібне зерно і досягають рівномірного розподілу структурних складових сталей. Порівняно з відпалюванням, нормалізація є більш дешевою термічною операцією, оскільки у цьому випадку термічні печі використовують лише для нагрівання та витримання сталі при температурі нормалізації.

Гартування

Це термічна операція, яка зводиться до нагрівання сталі до температури вище критичної або до температури розчинення надлишкових фаз і наступного швидкого охолодження зі швидкістю, що перевищує критичну. Критичною швидкістю гартування (V_{кр}) називають мінімальну швидкість охолодження, необхідну для розпаду аустеніту в інтервалі температур мартенситного перетворення. Тобто швидкість охолодження повинна бути досить великою, для того щоб при зниженні температури не встигли відбутися зворотні фазові перетворення, пов'язані з дифузією або самодифузією. У цьому принципова відмінність гартування від відпалу другого роду. Мета гартування – одержання нерівноважної структури і підвищення за рахунок цього міцності та твердості сталі.

Існують два різко відмінних види гартування:

- з поліморфним перетворенням;
- без поліморфного перетворення.

Гартування з поліморфним перетворенням – це термічна обробка, за якої головним процесом є мартенситне перетворення високотемпературної фази. Тому таку термічну обробку називають гартуванням на мартенсит. Таке гартування може бути застосоване практично до будь-яких металів і сплавів, здатних при охолодженні перебудувати кристалічну ґратку. Необхідну для проведення гартування швидкість охолодження забезпечують використанням певних середовищ з високою охолоджувальною здатністю.

Гартування без поліморфного перетворення – це термічна обробка, яка фіксує при більш низькій температурі стан сплаву, властивий йому за високих температур. Воно зводиться до нагрівання сталі або іншого сплаву до температури розчинення надлишкових фаз, витримування і швидкого охолодження для запобігання виділень надлишкових фаз з пересиченого твердого розчину. Таку обробку здійснюють для одержання гомогенної структури.

Залежно від температури нагрівання під гартування (аустенізації) розрізняють:

- повне;
- неповне гартування.

Повне гартування застосовують для обробки доєвтектоїдних сталей. При цьому сталь нагрівають на 30 - 60 °C вище температури для отримання вихідної структури аустеніту.

Неповне гартування застосовують для заєвтектоїдних сталей. Вихідна структура при цьому – аустеніт з цементитом. Цементит зберігається і в загартованій структурі сталі, оскільки має вищу твердість порівняно з мартенситом.

При гартуванні слід розрізняти і розуміти два важливі поняття:

- загартованість;
- прогартованість сталі.

Загартованість – це здатність сталі набувати максимальної твердості внаслідок гартування. Загартованість визначає вміст вуглецю у сталі. Так, низьковуглецеві сталі (до 0,2 % C) практично не загартовуються, їхня твердість внаслідок гартування практично не підвищується.

Прогартованість – це глибина загартованої зони або відстань від поверхні зразка сталі до шару, структура якого складається приблизно з однакових об'ємів мартенситу і троститу. Мірою прогартованості служить критичний діаметр (D_к). Це максимальний діаметр циліндричного зразка, що наскрізь прогартувався у даному охолоджувальному середовищі. Прогартованість кожної сталі визначають експериментально.

Залежно від потрібного комплексу властивостей виробів, їх призначення та хімічного складу застосовують різні способи гартування:

- гартування в одному охолоджувальному середовищі - переважно для деталей простої форми. Це безперервне гартування, охолоджуючим середовищем у більшості випадків служить вода або масло. Кінцева структура мартенсит і залишковий аустеніт, або мартенсит, карбіди і залишковий аустеніт залежно від вмісту вуглецю в сталі;

- переривчасте гартування здійснюють у двох охолоджувальних середовищах: спочатку деталь швидко охолоджують у воді до температури дещо вище точки M_p (див. діаграму стану), а потім швидко переносять до менш інтенсивного охолоджувача (масла, повітря), де охолоджують до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. У результаті використання другого охолоджуючого середовища зменшуються внутрішні напруження, які б мали місце за умов швидкого охолодження в одному середовищі (воді), в тому числі й в області температур мартенситного перетворення;

- сходникове гартування використовують для зменшення напружень, деформації та запобігання утворенню тріщин в інструменті з вуглецевих і легованих сталей. Сталь, нагріту до температури гартування, охолоджують у середовищі з температурою, дещо вищою M_p ($180 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$), і витримують у ньому порівняно короткий час. Далі сталь охолоджують на повітрі до нормальної температури. Внаслідок видержування у середовищі гартування досягають вирівнювання температури за перерізом виробу, проте перетворення аустеніту з утворенням бейніту не відбувається. Мартенситне перетворення відбувається під час охолодження на повітрі (але значно повніше), внаслідок чого сталь зберігає більше залишкового аустеніту порівняно з режимом безперервного гартування;

- ізотермічне (бейнітне) гартування здійснюють охолодженням сталі у середовищі з температурою вище M_p (у розплавах солей), з ізотермічним витримуванням у ньому до повного або неповного перетворення аустеніту з наступним охолодженням на повітрі. Кінцева структура – бейніт або бейніт і карбіди, іноді також мартенсит і залишковий аустеніт. Таке гартування використовують для зменшення теплових і структурних напружень, запобігання тріщин і деформації, підвищення конструктивної міцності;

- гартування з самовідпуском здійснюють охолодженням лише частини або поверхні виробу у воді або маслі, далі виріб охолоджується на повітрі. Загартована зона при цьому відпускається за рахунок тепла серцевини або тієї частини, що не була занурена в охолоджуючу рідину. Таке гартування застосовують для зменшення залишкових напружень і як заміну наступного низького відпуску, а в окремих випадках – для місцевого гартування, при індукційному поверхневому гартуванні;

- поверхневе гартування здійснюють для одержання твердої зносостійкої поверхні й збереження в'язкої серцевини. При індукційному або газоплазмовому нагріванні поверхні виробу серцевина після охолодження лишається незагартованою;

- гартування з обробкою холодом застосовують для усунення залишкового аустеніту, підвищення твердості й зносостійкості, стабілізації розмірів виробів. Обробку холодом виконують одразу після гартування, щоб уникнути стабілізації аустеніту при видержуванні за нормальних температур. Охолодження виробів здійснюють до температури нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-30 - -70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це підвищує твердість сталей з $0,8 - 1,1\text{ \% C}$ на $1 - 3\text{ HRC}$. Проте зростають напруження, тому після обробки холодом вироби піддають відпуску. Таку обробку використовують в основному для вимірювального інструменту, пружин і деталей з цементованих високолегованих сталей, що після гартування зберігають значну кількість залишкового аустеніту. Під час термічної обробки, перш за все при гартуванні сталі, відбуваються об'ємні зміни, які залежать від температури, швидкості охолодження і структурних перетворень. Це призводить до виникнення внутрішніх напружень, які зумовлюють утворення тріщин, короблення виробів тощо. Розрізняють такі внутрішні напруження:

- внутрішні напруження першого роду (зональні) виникають між різними частинами виробу і залежать від швидкості та рівномірності охолодження, розмірів і форми виробу, а також властивостей сталі. Такі напруження інколи називають термічними напруженнями;
- внутрішні напруження другого роду виникають між фазами внаслідок різних коефіцієнтів їхнього розширення або утворення нових фаз з різними об'ємами. Оскільки ці напруження виникають між окремими елементами структури, їх називають структурними напруженнями;
- внутрішні напруження третього роду виникають в об'ємах, що відповідають кільком елементарним коміркам кристалічної ґратки.

У цілому будь-які напруження, зрештою, викликають однаковий ефект, створюючи пружні деформації та викривлення кристалічної ґратки сплавів, зумовлюють зменшення конструкційної міцності виробів. Загартована сталь після охолодження завжди знаходиться у структурно напруженому стані (залишкові напруження). Необхідним і надійним заходом для зменшення негативного впливу залишкових напружень є відпуск. Після проведення відпуску при 550 °C протягом 15 - 30 хв напруження гартування практично зникають.

Відпуск загартованої сталі є завершальною операцією її термічної обробки, яка здійснюється для надання сталі потрібних механічних властивостей.

Відпуск

Відпуск – це нагрівання загартованої сталі до температур, нижчих A_1 (див. діаграму стану), витримування її за цієї температури та поступове охолодження до кімнатної температури. Мета відпуску – переведення нерівноважної структури загартованої сталі у більш рівноважний стан, підвищення в'язкості та пластичності сталі, зменшення її твердості. Відпуском також знімають внутрішні напруження, які виникають під час гартування. Основний вплив на властивості сталі має температура відпуску. Залежно від температури розрізняють три види відпуску.

Низькотемпературний (низький) відпуск здійснюють при нагрівання сталі до 150 - 250 °C протягом 1,5 - 3 год. під час цього тетрагональний мартенсит гартування перетворюється на мартенсит відпуску (кубічний), дещо знижується твердість і крихкість, зменшуються внутрішні напруження гартування. Такому відпуску піддають різальні та вимірювальні інструменти з вуглецевих і легованих сталей, а також вироби після цементації.

Середньотемпературний (середній) відпуск здійснюють при 300 - 450 °C для обробки деталей, що працюють за умов тертя і динамічних навантажень (штампи, пружини, ресори). Структура сталі для середнього відпуску – тростит відпуску або троостито- мартенсит, твердість сталі 40 - 50 HRC. Це забезпечує високий поріг пружності, в'язкості та опір розриву сталі.

Високотемпературний (високий) відпуск проводять при 500 - 680 °C. При цьому відбувається збільшення розміру і сфероїдизація дисперсних карбідних часток, зростає феритне зерно і утворюється сорбіт відпуску. Високий відпуск створює найкраще співвідношення міцності й в'язкості сталі. Тому термічну обробку, яка складається з гартування та високого відпуску, називають поліпшенням.

Високий відпуск застосовують для обробки деталей з середньовуглецевих (0,3 - 0,5 % C) і спеціальних сталей, що працюють при підвищених і динамічних навантаженнях (вали, осі, елементи кріплення). Високий відпуск протягом 1 - 2 год повністю знімає залишкові напруження, що виникають при гартуванні. Залежно від габаритів виробу тривалість високого відпуску може складати 1 - 6 год. Після гартування, швидкого охолодження після відпуску або після холодної пластичної деформації сталі утворюється нерівноважна структура із мікрооб'ємами, пересиченими вуглецем і азотом.

Старіння – це процес зміни властивостей сталі, зумовлений виділенням надлишкового вуглецю (азоту) у вигляді дуже дрібних скупчень карбідів або нітридів. Старіння здійснюють нагріванням сталі до певної температури, витриманням при цій температурі з наступним охолодженням. Така обробка сприяє підвищенню твердості й міцності, зниженню пластичності та ударної в'язкості, а також зменшенню внутрішніх напружень. Старіння може бути природним (за кімнатної температури) і штучним (при нагріванні до певної температури). Штучне старіння сталей здійснюють при 200 - 300 °С, тривалість нагрівання залежить від хімічного складу сталей. Старіння після термічної обробки називають термічним старінням, а після холодної пластичної деформації – деформаційним старінням.

Результати старіння можна розглядати по-різному. В одних випадках старіння є позитивним процесом і його використовують для зміцнення деталей з пружинних сталей, які повинні забезпечити високі пружні властивості та міцність; при термічній обробці швидкорізальних сталей, а також сплавів алюмінію, магнію, титану тощо. В інших випадках старіння є негативним і може зумовлювати зниження ударної в'язкості та порога холодноламкості, руйнування конструкцій, залізничних рейок тощо. Якщо під час експлуатації сталі можливе її нагрівання, коагуляція фаз, що виділились, і зниження міцності, то при старінні намагаються одержати такий рівень властивостей, що буде стабільним за даних умов експлуатації. Таке старіння називають стабілізацією.

Термічна обробка чавуну

Особливістю термічної обробки чавунів на відміну від сталі є необхідність строгого врахування структурного стану та властивостей вихідного чавуну. Специфічними процесами термічної обробки чавунів є графітизація, тобто розкладання цементиту для зменшення кількості зв'язаного вуглецю; розчинення графіту і збагачення вуглецем аустеніту, що зумовлює збільшення кількості перліту у структурі чавуну. Термічна обробка чавунів сприяє зменшенню внутрішніх напружень у виливках, одержанню стабільної структури і розмірів, підвищенню твердості та стійкості проти спрацювання у спосіб гартування та відпуску, надає чавуну (білому) підвищеної міцності та пластичності відпалюванням.

Основними видами термічної обробки сірого чавуну є:

- відпал;
- нормалізація;
- гартування (об'ємне, поверхневе);
- відпуск.

Низькотемпературний відпал (500 - 600 °С), або штучне старіння, протягом 1 - 8 год здійснюють повільним нагріванням (70 - 100 °С/год) і повільним охолодженням з піччю (20 - 50 °С/год) до 250 °С і далі – на повітрі. Застосовують його для зняття напружень, запобігання деформації й тріщиноутворення під час механічної обробки та експлуатації.

Середньотемпературний відпал (680 - 750 °С) - графітизуючий, застосовують для зменшення твердості, підвищення пластичності та ударної в'язкості, поліпшення оброблюваності. Залежно від потрібної структури тривалість відпалювання змінюють у межах 1 - 4 год.

Високотемпературний відпал (850 - 950 °С) - графітизуючий (0,5 - 5,0 год), використовують для зменшення твердості та поліпшення оброблюваності. Здійснюють повільним нагріванням і охолодженням з піччю до 250 °С, далі – на повітрі.

Нормалізацію (охолодження на повітрі) від 850 - 950 °С застосовують для підвищення твердості та зносостійкості.

Гартування у воді або маслі від 850 - 930 °С з витримуванням при нагріванні 0,5 - 3,0 год використовують для підвищення твердості до 500 НВ, міцності та зносостійкості. Ізотермічне гартування чавуну переважає традиційні види підвищення твердості та зносостійкості виробів, проте ускладнює обробку різанням. Воно зводиться до аустенітизації та наступного ізотермічного розпаду аустеніту в проміжній області С-подібної діаграми з утворенням переважно структури бейніту. Ізотермічне гартування чавуну складається з двох етапів:

- аустенізації при 820 - 900 °С, витримування за цієї температури 0,2 - 1,5 год;
- переохолодження аустеніту з наступним розпадом його в ізотермічних умовах в інтервалі температур від 250 - 300 до 450 - 500 °С.

Швидко нагріваючи поверхню чавуну до 840 - 950 °С струмами високої частоти, газовим полум'ям тощо і охолоджуючи у воді, маслі та інших охолоджувальних середовищах здійснюють поверхневе гартування. Це забезпечує підвищення твердості до 55 HRC та стійкості проти спрацювання.

Відпуск виробів із сірих чавунів застосовують для усунення термічних напружень, підвищення в'язкості та пластичності. При цьому температура відпуску становить 250 - 600 °С, тривалість – 1 - 3 год залежно від потрібної твердості.

Термічну обробку білого чавуну проводять для одержання з нього ковкого чавуну з високою міцністю та пластичністю, застосовуючи для цього спеціальний режим графітизуючого відпалювання. Для цього використовують білий чавун з досить вузьким інтервалом вмісту легуючих елементів: 2,4 - 2,8 % С; 0,8 - 1,4 % Si; < 1 % Mn; ≤ 0,1 % S; ≤ 0,1 % Р. Під час графітизуючого відпалу цементит у чавуні розпадається з утворенням фериту і графіту або перліту і графіту. Феритний ковкий чавун на зламі має темний колір, тому його називають чорносердечним. Злам перлітного чавуну сірий і його називають білосердечним.

Сучасний процес графітизуючого відпалу складається з двох стадій. Перша стадія – рівномірне нагрівання до 950 - 1000 °С. За цієї температури відбувається графітизація надлишкового цементиту (10 - 15 год), потім чавун охолоджують з піччю до 740 °С зі швидкістю 70 - 100 °С/год. Друга стадія – ізотермічна обробка за такої температури (протягом майже 30 год), після чого чавун охолоджують на повітрі. На цій стадії графітується цементит перліту. Остаточна структура після графітизуючого відпалювання складається з фериту та пластівчастого графіту.

Перлітний ковкий чавун отримують у результаті неповного відпалювання: після першої стадії графітизації при 950 - 1000 °С чавун охолоджується з піччю, друга стадія графітизації не проводиться. Для підвищення в'язкості перлітний чавун піддають сфероїдизації при 700 - 750 °С, за якої отримують структури зернистого перліту. При термічній обробці ковких чавунів для підвищення міцності та зносостійкості їх піддають гартуванню з відпуском або нормалізації. Гартування здійснюють від 850 - 900 °С з охолодженням у маслі або воді, відпуск – залежно від потрібної твердості (у більшості випадків при 650 - 680 °С). Гартування можна здійснювати також після першої стадії графітизації по досягненні температури 850 - 880 °С з наступним високим відпуском, застосовують також режим поверхневого гартування.

Нормалізацію ковкого чавуну здійснюють нагріванням до 850 - 900 °С з витримуванням 1 - 1,5 год і наступним охолодженням на повітрі. Якщо нормалізовані вироби мають підвищену твердість, їх після цього піддають високому відпуску при 650 - 680 °С протягом 1 - 2 год.

Термічну обробку високоміцного чавуну проводять для того, щоб зняти внутрішні напруження (на 80 - 90 %) виливків складної форми. Для цього їх повільно нагрівають до

500 °C, витримують за цієї температури 2 - 3 год і охолоджують з піччю до 200 °C, а далі – на повітрі.

Контрольні запитання

1. Як класифікують основні види термічної обробки?
2. Що таке відпал сталі?
3. Чим відрізняється відпал першого і другого роду?
4. Що таке гартування сталі та які існують види гартування?
5. Що таке загартованість та прогартованість сталі?
6. Що таке внутрішні напруження?
7. Що таке відпуск сталі?
8. Які перетворення відбуваються під час відпуску?
9. Які види відпуску існують?
10. Що таке старіння сталі?