**1. Класифікація видів термічної обробки**

**Термічна обробка сталі** це процес її нагрівання до визначеної температури, витримування при цій температурі й подальше охолодження із заданою швидкістю з метою зміни структури та властивостей у бажаному напрямі.

Термічно обробляють виливки, кованки, напівфабрикати (отримані вальцюванням, волочінням або пресуванням), зварні вироби, деталі машин та інструменти різного призначення. Термічну обробку застосовують або як проміжну операцію для поліпшення технологічних властивостей (оброблюваності тиском чи різанням), або як прикінцеву технологічну операцію для досягнення певних експлуатаційних властивостей матеріалу. Що складніша й відповідальніша конструкція виробу, то більша частка в ньому термооброблених деталей.

***Основні види термічної*** обробки: відпал, гартування, відпуск і старіння.

**Відпал -** вид термічної обробки, в результаті якого метали чи сплави здобувають структуру, близьку до рівноважної. Відпал викликає зміцнення металів і сплавів, що супроводжується збільшенням пластичності та зняттям залишкових напружень. Температура нагрівання при відпалі залежить від складу сплаву та різновиду відпалу, швидкість охолодження звичайно невелика і складає 3-200 Со/годину.

**Гартування** - вид термічної обробки, в результаті якого в металах і сплавах утвориться не рівноважна структура. Нерівноважність структури при термічній обробці можна одержати у випадку, коли у сплавах є перетворення в твердому стані: змінна розчинність, поліморфні перетворення твердих розчинів, розпад не рівноважної структури. Проводять нагрівання сплаву до температури фазового перетворення в твердому стані, після чого швидко охолоджують, щоб запобігти рівноважному перетворенню при охолодженні. Конструкційні та інструментальні сталі піддають гартуванню з метою зміцнення і підвищення твердості. Сильно зміцнюються при гартуванні сплави, в яких евтектоідне перетворення відбувається в рівноважних умовах.

**Відпуск і старіння** цевиди термічної обробки, в результаті яких в попередньо загартованих сплавах відбуваються фазові перетворення, що наближають їх структуру до рівноважної.

Сполучення гартування з відпуском чи старінням практично завжди має на меті одержання більш високого рівня властивостей у порівнянні з відпаленим станом: твердості, характеристик міцності та інше.

Термічне старіння полягає в тому, що в загартованих сплавах при кімнатній температурі (природне старіння) чи при нагріванні (штучне старіння) протікають фазові перетворення, що наближають їх до стійкого стану. Однак, механічні властивості сплавів при старінні, у порівнянні з відпуском, змінюються в оборотному напрямку: міцність і твердість збільшуються, а пластичність і в'язкість зменшуються.

**Нормалізація** є різновидом відпалу. При нормалізації, сталь також нагрівають вище температур фазових перетворень в твердому стані, але охолодження проводять на повітрі. Тому твердість і міцність сталі після нормалізації вище, ніж після відпалу.

Окрім основних видів буває термічна обробка сплавів, що не мають фазових перетворень.

***Нагрівання для зняття залишкових напруг.*** Багато які технологічні впливи супроводжуються виникненням в оброблюваних виробах залишкових напруг першого роду, що врівноважуються в об'ємах одновимірних з об'ємом оброблюваного виробу (наприклад, у виливках, у зварних з'єднаннях, при гартуванні і так далі). Ці напруги небажані, тому що можуть викликати деформацію виробу в процесі роботи чи передчасне порушення деталі. По величині залишкові напруги можуть досягати границі текучості. Для їх зменшення вироби нагрівають. З підвищенням температури σт (границя текучості) понижується, тому залишкові напруги викликають пластичну деформацію та понижуються до рівня границі текучості металу при температурі нагрівання. В сталевих і чавунних деталях істотне пониження залишкових напруг відбувається в процесі витримки при температурі 450о С. Після витримки при температурі 600оС напруги зменшуються до дуже низьких значень. Час витримки: від декількох до десятків годин. По закінченні витримки вироби повільно охолоджують із швидкістю V ≈200оС/год, щоб запобігти виникненню нових напруг.

**Рекристалізаційний відпал** - нагрівання холодно-деформованих виробів вище температурної межі рекристалізації - Трек. У процесі витримки відбувається рекристалізація. Швидкість охолодження при цьому різновиді відпалу не має вирішального значення, звичайно охолодження по закінченні витримки проводять на повітрі. Метою відпалу може бути: зниження міцності і відновлення пластичності деформованого металу, одержання певної кристалографічної текстури, що створює анізотропію властивостей і одержання заданої величини зерна. Температура відпалу на 100http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image001.gif200° вище Трек(межі рекристалізації). Fе - 650http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image001.gif570°С, Al - 400http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image001.gif450°С.

***Дифузійний відпал (гомогенізація).*** *В* реальних умовах охолодження розплаву кристалізація твердих розчинів найчастіше протікає нерівноважно: дифузійні процеси, необхідні для вирівнювання зростаючих кристалів, за об'ємом відстають від самого процесу кристалізації. В результаті зберігається неоднорідність складу по об'єму кристалів - внутрішньо-кристалічна ліквація: серцевина кристалів збагачена тугоплавким компонентом сплаву, а зовнішні частини кристалів збагачені компонентами, що понижують температуру плавлення. Внутрішньо-кристалічна ліквація, особливо у випадку появи в структурі евтектичної складової, перешкоджає обробці сплавів тиском (зменшує пластичність) і погіршує механічні властивості через неоднорідність структури. **Дифузійний відпал (гомогенізація)** - довготривала витримка сплавів при високих температурах, в результаті якої зменшується лікваційна неоднорідність твердого розчину. При високій температурі протікають дифузійні процеси, що не встигли завершитися при первинній кристалізації. У сталевих злитках в результаті дифузійного відпалу досягається більш рівномірний розподіл фосфору, вуглецю і легуючих елементів в об'ємі зерен твердого розчину. Якщо температура відпалу досить висока, відпал призводить і до більш сприятливого розподілу сульфідів.

Дифузійний відпал сталевих злитків (виливків) проводять при температурах 1110http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image001.gif1130°С витримкою 20-50 годин, алюмінієвих злитків при Т=420http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image001.gif520оС витримкою 20-30 годин.

**2. Чотири основні перетворення в сталях**

При термічній обробці сталі спостерігаються ***чотири основні перетворення***.

І. **Перетворення перліту в аустеніт**, що протікає вище точки А1 (рис. 23.1), вище температури стабільної рівноваги аустеніт-перліт; при таких температурах із трьох основних структур (Аустеніта, Перліта та Мартенсита) мінімальною вільною енергією володіє мартенсит:

* Feα + Fe3C→Feγ(C) або П→А.

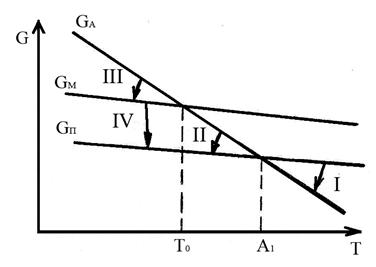


Рисунок 23.1 - Зміна вільної енергії аустенита (GA), мартенсита (GМ) і перліта (GП) зі зміною температури; позначення І - IV характеризує перше-четверте перетворення відповідно.

ІІ. **Перетворення аустеніта в перліт**, яке відбувається нижче точки А1:

* Feγ(C) → Feα + Fe3C або А→П.

ІІІ. **Перетворення аустеніта в мартенсит**:

* Feγ(C) → Feα(С) або А→М.

Це перетворення спостерігається нижче температури метастабільної рівноваги аустеніт-мартенсит (Т0). Аустенітно-мартенситне перетворення є проміжним у процесі перехода аустеніта в перліт.

ІV. **Перетворення мартенсита в перліт**, точніше в ферито-карбідну суміш:

* Feα(C) → Feα + Fe3C або М→П.

Відбувається при всіх температурах, бо при всіх температурах вільна енергія мартенситу більша за вільну енергію перліта (точніше ферито-карбідної суміші).

**3. Перетворення, що відбуваються у сталях під час нагрівання**

Якщо нагрівати дуже повільно, то всі фазові перетворення у вуглецевих сталях описує ліва частина діаграми залізо-вуглець (див. рис. 22.6).

Зазначимо, що критичні температури цих перетворень позначають буквою А з певними індексами. Зокрема, температуру лінії РSК позначають через А1 і температури лінії SE - через А3, а температури лінії SE - через АСm. До названих позначень додають індекс с в разі охолодження або індекс r - при нагріванні, наприклад: АС1, АСm1, Аr3. Відхилення від рівноважних умов спричинює тепловий гістерезис, тобто розбіжність критичних температур нагрівання та охолодження.

Зупинимось на фазових перетвореннях, що відбуваються під час нагрівання у доевтектоїдній, евтектоїдній та заевтектоїдній сталях із вихідними рівноважними структурами.

Структура доевтектоїдної сталі при кімнатній температурі - ферит + перліт (див. рис. 22.6). При температурі АС1 (лінія РSК) перліт перетворюється в аустеніт. Вище від цієї лінії буде двофазова структура: ферит + аустеніт. В інтервалі температур АС1 ... АС3 ферит поступово розчиняється у аустеніті й при АС3 зовсім зникає. Вище АС3 маємо тільки аустеніт.

В евтектоїдній сталі структура перліту зберігається аж до температури АС1, при якій перліт повністю перетворюється в аустеніт.

У заевтектоїдній сталі з перлітно-цементитною структурою при температурі АС1 перліт перетворюється в аустеніт, а в проміжку температур АС1 … Асm вторинний цементит поступово розчиняється в аустеніті.

Отже, в результаті описаних перетворень у сталях формується однофазова аустенітна структура, яка займає частину діаграми вище лінії GSE аж до лінії солідус.

У виробничих, як правило, нерівноважних умовах нагрівання (на відміну від розглянутих рівноважних) температура перетворення перліту в аустеніт перевищує АС1, про що свідчить діаграма ізотермічного перетворення (рис. 23.2), побудована в координатах температура t- час τ. Для побудови діаграми використані дані випробовувань зразків евтектоїдної сталі, кожен з яких нагрівали до заданої температури, що перевищувала АС1, витримували при цій температурі й реєстрували час початку та кінця перетворення перліту П в аустеніт А. З'єднавши точки початку перетворення, отримували лінію І і, з'єднавши точки кінця перетворення, - лінію ІІ. Лівіше лінії I маємо перліт, правіше лінії II - аустеніт, а між цими лініями - обидві названі структури: перліт + аустеніт. Щоб отримати якісну картину перетворень, на діаграму нанесено швидкості нагрівання vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image007.gif, vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image008.gif, vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image009.gif у вигляді прямих. Очевидно, що vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image007.gif,<vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image008.gif,<vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image009.gif.

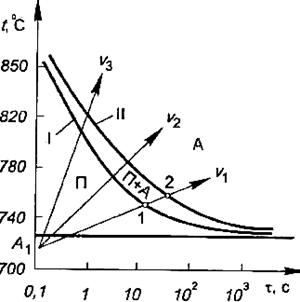


Рисунок 23.2 - Діаграма ізотермічного перетворення перліту в аустеніт (сталь евтектоїдна):

* І - початок перетворення;
* II - кінець перетворення перліту (П) в аустеніт (А);
* 1,2 - точка початку й кінця перетворення перліту в аустеніт;
* v1, v2, v3 - швидкість нагрівання

При найнижчій швидкості нагрівання vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image007.gif спостерігаємо незначне перегрівання перліту відносно А1 і порівняно велику тривалість до початку перетворення перліту у вигляді відтинка часу між віссю ординат і точкою 1. Закінчується перетворення в точці 2. Зі збільшенням швидкості нагрівання до vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image008.gif, а згодом і до vhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image009.gif, бачимо, що температура перетворення істотно зростає, а тривалість процесу зменшується. Криві І і II з часом асимптотично наближаються до критичної температури А1 і на нескінченості зливаються з нею. Збіг кривих початку й кінця перетворення з критичною температурою Аhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/3d/98/06/2d/2d/11/df/5a/01/4c/54/fe/9d/05/8f/r6t12.files/image011.gif відповідає рівноважному перетворенню перліту.

***Перехід перліту в аустеніт*** складається із двох частин: поліморфного перетворення Fеα (фериту) в Fеγ (аустеніт) та подальшого розчинення вуглецю цементиту в аустеніті. Поліморфне перетворення фериту в аустеніт закінчується порівняно швидко, а повне розчинення цементиту вимагає додаткового часу.

Після повного розпаду перліту вуглець нерівномірно розподілений в зернах аустеніту. Його більше там, де були пластинки (зерна) цементиту. Дифузія поступово вирівнює склад аустеніту.

**4. Ріст зерен аустеніту**

Зародки майбутніх зерен аустеніту виникають у перлітних колоніях на границях між феритом й цементитом.

В залежності від умов нагрівання, можна одержати зерно аустеніту різної величини (рис. 23.3). Від розміру кристалів аустеніту у великій мірі залежать властивості продуктів перетворення. Продукти перетворення дрібнокристалічного аустеніту, як рівноважні, так і метастабільні, мають більш високу пластичність і в'язкість, але меншу чутливість до концентраторів напруг, чим відповідні продукти перетворення крупнокристалічного аустеніту. Зародження кристалів при розпаді аустеніта (А) відбувається переважно на границях зерен тому, що чим дрібніше зерно А, тим більше виникає центрів кристалізації і тим дрібніше будуть знову утворені кристали.

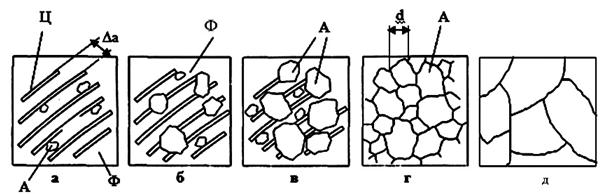


Рисунок 23.3 - Схема утворення та росту аустенітного зерна при нагріванні сталі вище температури АС1:

* а - початок перетворення перліта (Ц+Ф) в аустеніт (А) (Δа - міжпластинчаста відстань);
* б-в - перетворення П→А зі збільшенням температури від А1→А3;
* г - заключне перетворення П→А (d - розмір зерна);
* д - ріст зерна при довготривалій витримці вище температури АС3

Оскільки в кожній колонії зароджується декілька центрів нових кристалів, то очевидно, розпад перліту супроводжується здрібненням зерен сталі. Їх розмір наприкінці перетворення перліту в аустеніт визначає величину ***початкового зерна аустеніту dA*** (рис. 23.4). Подальше підвищення температури нагрівання й тривалості витримки в однофазовій аустенітній області спричинює ріст зерен аустеніту, що нагадує збиральну рекристалізацію. Залежно від схильності зерен аустеніту до росту під час нагрівання сталі поділяють на спадково дрібнозернисті та спадково грубозернисті.

***Спадково дрібнозернисті сталі*** такі***,*** упродовж нагрівання яких до 950...1000 °С зерна незначно ростуть (крива I), а подальше підвищення температури інтенсифікує цей ріст. Швидкість росту зерен аустеніту залежить від способу дезоксидації та наявності в сталі легувальних елементів. Сталі, дезоксидовані алюмінієм, мало схильні до росту зерен аж до температур 950...1000 °С. Це спричинюють дрібні частинки нітриду алюмінію АIN, розташовані по границях зерен аустеніту. При температурі понад 1000 °С нітрид алюмінію розпадається й зникають перешкоди для росту зерен. Майже всі карбідоутворювальні елементи, за винятком марганцю, також гальмують ріст зерен. Що дисперсніші карбіди, то більше перепон для росту зерен аустеніту вони створюють.

***Спадково грубозернисті сталі*** де зерна ростуть навіть після незначного перегріву (крива II). Ростові сприяють марганець і фосфор. Сталі, дезоксидовані лише феромарганцем або феромарганцем й феросиліцієм, належать до спадково грубозернистих. Отже, у спадково дрібнозернистій сталі при температурах, вищих АС, зерно аустеніту (А) дрібніше (крива І), ніж у спадково грубозернистій (крива II). Лише в точці перетину кривих І і II величини зерен обох сталей рівні, а під час подальшого підвищення температури, наприклад до t2, зерно спадково дрібнозернистої сталі стає навіть більшим від зерна спадково грубозернистої.

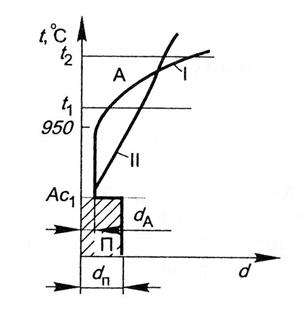


Рисунок 23.4 - Вплив температури нагрівання t на величину зерна d аустеніту спадково дрібнозернистої (I) і грубозернистої (II) сталі:

* dA - розмір початкового зерна аустеніту (А);
* dп - розмір вихідного зерна перліту (П)

Величина зерна аустеніту помітно впливає на властивості сталі. Із великого зерна аустеніту утворюється грубозерниста структура продуктів розпаду під час охолодження. Дрібнозернисті сталі дещо міцніші й пластичніші, а грубозерниста структура спричинює помітне зниження ударної в'язкості.

***Дійсна величина зерна*** - це розмір зерна при кімнатній температурі, отриманий після тієї або іншої термообробки. Із грубого зерна аустеніту утворюється, як правило, грубе дійсне зерно.

Необґрунтовано вибраний режим нагрівання може призвести до перегріву або перепалу сталі. ***Перегрів*** характеризує температура початку інтенсивного росту зерна. Щоб усунути грубозернисту структуру, необхідно повторно нагріти сталь до меншої температури, ніж температура перегріву. ***Перепал*** сталі настає в оксидаційній атмосфері при температурах, близьких до лінії солідус. В результаті на границях зерен утворюються оксиди. Перепал зумовлює непоправне пошкодження сталі, це брак.

**5. Перетворення в сталі під час охолодження аустеніту**

Якщо аустеніт А охолоджувати з підвищеною швидкістю, то він розпадається на феритно-цементитну суміш - перліт П при температурах, нижчих за критичну. В умовах переохолодження вільна енергія аустеніту більша від вільної енергії продуктів його розпаду - фериту й цементиту. Новоутворені фази істотно відрізняються від аустеніту за хімічним складом: ферит містить до 0,02 % С, цементит - 6,67 % С. Отже, щоб відбувалось перетворення А→П, необхідна ***дифузія*** вуглецю, яка перерозподіляє його концентрацію. Зі збільшенням переохолодження зростає різниця ΔG вільних енергій аустеніту GA й перліту GП: ΔG = GA - GП, що пришвидшує процес перетворення. Проте зниження температури сповільнює дифузію атомів вуглецю, що гальмує перетворення. При певному значенні ΔG швидкість розпаду аустеніту v досягає максимуму, після чого вона поступово зменшується і при температурі ~ 200 °С знову наближається до нуля. В гальмуванні швидкості перетворення аустеніту після її максимального значення вирішальну роль відіграє дифузія, активність якої зі зниженням температури поступово зменшується.

***Перетворення аустеніту*** складається зі стадії зародження центрів нових фаз - фериту та цементиту й стадії подальшого їх росту. Про розпад аустеніту свідчить зміна певних фізичних властивостей матеріалу зразка, наприклад, його магнітних характеристик. Відомо, що аустеніт парамагнітний, а продукти розпаду - ферит і цементит - феромагнітні. Магнітометричним методом можна будь-коли кількісно визначити ступінь перетворення аустеніту. Кінетична крива перетворення ілюструє зростання в часі частки перетвореного аустеніту після деякого інкубаційного періоду.

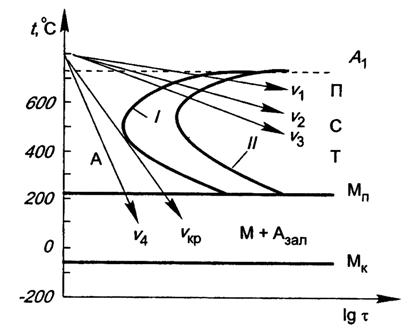


Рисунок 23.5  - Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту та лінії охолодження:

* I - лінія початку;
* II - лінія кінця розпаду переохолодженого аустеніту;
* Мп - лінія початку мартенситного перетворення;
* Мк - лінія кінця мартенситного перетворення;
* v1, v2, v3, v4, vkp- швидкості охолодження;
* П - перліт;
* С - сорбіт;
* Т - тростит

За серією кінетичних кривих перетворення, кожна з яких отримана при іншій температурі, будують діаграму ізотермічного перетворення аустеніту в координатах температура t - час τ; звичайно час відкладають на логарифмічній шкалі (рис. 23.5). З кожної кінетичної кривої перетворення на діаграму переносять точки (час) початку й кінця процесу (ці точки на діаграмі не зображені). З'єднавши відповідні точки, отримують ***С-подібні криві*** - це лінії початку I і кінця II перетворення. Зліва від кривої початку перетворення маємо переохолоджений аустеніт А, справа від кривої кінця перетворення - продукти його розпаду: П, С, Т, а між кривими - разом аустеніт і продукти розпаду. Бачимо, що час до початку перетворення - інкубаційний період - найменший для ступеня переохолодження Δ t= 150...200 °С, відрахованого від А1. Лінія Мп відповідає температурі початку, а лінія Мк - температурі кінця мартенситного перетворення.