

## ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

У сучасному машинобудуванні термічна обробка є найбільш поширеним способом зміни структури та властивостей металів і сплавів. Це технологічний процес теплової обробки металів і сплавів з метою зміни їхньої структури та властивостей шляхом нагрівання і охолодження. Результатом термічної обробки є зміцнення або знеміцнення сплаву (сталі). Проте термічна обробка ефективно впливає на властивості лише тих сплавів, які мають не менше двох фаз, здатних до перетворення при нагріванні і охолодженні. Так, залізовуглецеві сплави (сталі) мають дві поліморфні модифікації: на основі  $\alpha$ -заліза (ОЦК-гратка) і  $\gamma$ -заліза (ГЦК-гратка), які зумовлюють можливість проведення термічної обробки сталей. Наукові основи термічної обробки було закладено Д.К.Черновим у 1868р. відкриттям критичних температур, за яких відбуваються фазові перетворення при нагріванні і охолодженні сталі, та побудовою на їхній основі діаграми стану системи залізо-вуглець.

Будь-яка операція термічної обробки – це нагрівання металу до певної температури ( $t$ ) з потрібною швидкістю нагрівання ( $V_n$ ), витримування за цієї температури протягом певного часу ( $\tau$ ) й охолодження із заданою швидкістю ( $V_{ox}$ ). Залежно від температури нагрівання розрізняють обробку з нагрівом до температур вище і нижче температури фазових перетворень ( $T_n$ ). Температура нагрівання та швидкість охолодження визначають вид термічної обробки. Нагрівання вище температури фазових перетворень і подальше повільне охолодження призводять до фізико-хімічної та структурної рівноваги сталі. Такі операції називають відпалюванням. Швидке ж охолодження заважає утворенню рівноважної структури, й таку операцію називають гартуванням. Нагрівання до температури нижче за температуру фазових перетворень сприяє наближенню до стану рівноваги. Вплив швидкості охолодження при цьому незначний. Такі операції термічної обробки називають відпуском.

Фазові перетворення в сталі відбуваються внаслідок зміни умов (наприклад, температури), коли один стан системи стає менш стабільним за інший.

Розрізняють такі основні структурні стани під час термічної обробки сталі:

- аустеніт (А) – твердий розчин вуглецю (С) в  $\gamma$ -залізі Fe $\gamma$ ;
- мартенсит (М) – перенасичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі Fe $\alpha$  (С);
- перліт (П) – евтектоїдна суміш фериту (Ф) і цементиту Fe $\alpha$ +Fe $3$ C.

Перетворення перліту в аустеніт (П  $\rightarrow$  А) відбувається за нагрівання сталі вище за температуру критичної точки (727 °С, лінія PSK) (діаграма стану Fe – Fe $3$ C). За нагрівання вище 727 °С відбуваються процеси дифузії атомів вуглецю для досягнення концентрації 0,8 %. Швидкість перетворення зростає при підвищенні температури.

При нагріванні евтектоїдної сталі (0,8 % С) вище за точку  $A_1$  (780...800 °С) на межі фериту і цементиту починається перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$  з утворенням низьковуглецевого аустеніту, в якому розчиняється цементит. Перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$  відбувається швидше, ніж розчинення цементиту. Тому, коли вся  $\alpha$ -фаза (ферит) перетвориться на  $\gamma$ -фазу (аустеніт), частина цементиту залишиться нерозчиненою, і лише після розчинення всього цементиту перетворення закінчується. Проте аустеніт, що утворився, має досить нерівномірну концентрацію вуглецю, яка зменшується від центру до периферії зерна. Лише після тривалого нагрівання або підвищення температури внаслідок дифузії аустеніт стає однорідним щодо вмісту вуглецю.

Доевтектоїдні сталі за температур вище температури  $A_1$  мають структуру аустеніт+ферит і лише вище температури  $A_3$  (лінія GS діаграми) набувають однорідної структури аустеніту.

У разі нагрівання заевтектоїдних сталей вище  $A_1$  (подібно до евтектоїдних) перліт спочатку перетворюватиметься на аустеніт, а з підвищенням температури вторинний цементит розчинюватиметься в аустеніті. Вище температури  $A_{cm}$  (крива SE діаграми) розчинення цементиту закінчується і утворюється однорідний аустеніт. Оскільки аустеніт утворюється на межі фериту і цементиту, то утворення перліту з дрібною структурою і з більшою протяжністю границь зерен відбувається швидше.

З підвищенням температури зростає швидкість утворення центрів кристалізації аустеніту, а також швидкість росту його зерен. Залежно від схильності до зростання розмірів аустенітного зерна за підвищення температури, розрізняють спадково дрібнозернисту сталь і спадково крупнозернисту. Спадковість зерна залежить від хімічного складу, умов виплавки та тверднення, неметалевих включень тощо. Такі елементи, як V, Ti, Mo, W, Al сприяють зменшенню росту зерна, а Mn, P – зростанню його розміру.

Перетворення аустеніту на перліт ( $A \rightarrow P$ )

Перетворення ( $A \rightarrow P$ ) відбувається в процесі охолодження сталі від температур аустенітного стану до кімнатної температури. Перетворення (розпад) може відбуватися лише за температур, нижчих від критичної точки  $A_1$  ( $727^\circ\text{C}$ ), за умови, що вільна енергія аустеніту вища за вільну енергію продуктів його перетворення. Тобто аустеніт має бути переохолодженим. Від ступеня переохолодження (температури), за якого відбувається перетворення, залежать швидкість перетворення та структурний стан продуктів розпаду аустеніту.

Розрізняють три основні етапи перетворення аустеніту під час охолодження:

- перетворення  $\text{Fe}\gamma \rightarrow \text{Fe}\alpha$  (ГЦК  $\rightarrow$  ОЦК-гратка);
- зародження центрів кристалізації цементиту ( $\text{Fe}_3\text{C}$ );
- зростання зерен цементиту.

Внаслідок цих процесів відбувається утворення і зростання пластинчастих кристалів фериту і цементиту, що утворюють перлітну колонію. Залежно від швидкості охолодження (ступеня переохолодження) утворюються різні структури, зумовлені повнотою проходження трьох основних етапів перетворення й відповідно дисперсністю структурних складових сталі. При швидкості охолодження  $V_{ох} \leq 30^\circ\text{C}/\text{с}$  реалізуються всі етапи перетворення і формується структура пластинчастого перліту з міжпластинчастою відстанню  $\Delta 0 = 0,6 \dots 1,0$  мкм і твердістю 180...250 НВ. Збільшення швидкості охолодження до  $50^\circ\text{C}/\text{с}$  дає змогу реалізувати перший та другий етапи перетворення повністю, а третій – лише частково. При цьому утворюється дисперсніша феритно-цементитна суміш ( $\Delta 0 = 0,25 \dots 0,3$  мкм, 250...300 НВ) – сорбіт. При  $V_{ох} = 100^\circ\text{C}/\text{с}$  сповна реалізується лише перший етап, другий – частково, а третій зупиняється одразу ж на початку перетворення. Тому утворюється дуже дрібна структура ферито-цементитної суміші – тростит ( $\Delta 0 = 0,1 \dots 0,15$  мкм, 350...450 НВ), будову якого можна спостерігати за великих збільшень ( $\times 7000 \dots 8000$ ). швидкість охолодження  $V_{ох} = 150 \dots 200^\circ\text{C}/\text{с}$  дає змогу реалізувати лише перший (бездифузійний) етап перетворення з утворенням структури мартенситу (65 HRC). Перліт, сорбіт і тростит, які утворюються під час дифузійного розпаду аустеніту, є ферито-цементитними структурами пластинчастої будови, що відрізняються лише ступенем дисперсності (подрібнення).

Перетворення аустеніту в мартенсит ( $A \rightarrow M$ )

Це перетворення має зовсім відмінну природу, не таку як при формуванні ферито-цементитних сумішей. Характерною особливістю аустенітно-мартенситного перетворення є його бездифузійність. Мартенсит – це пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі. У разі значного переохолодження (коли швидкість охолодження вища від критичної –  $V_{кр}$ ) вуглець не встигає виділитися з аустеніту у вигляді цементиту, як це відбувається за утво-

рення перліту, сорбіту і троститу. Він залишається у кристалічній гратці  $\alpha$ -заліза, утворює пересичений твердий розчин і викликає внаслідок цього зміну ОЦК-гратки на тетрагональну з елементарною коміркою у вигляді прямокутного паралелепіпеда. Перетворення аустеніту у мартенсит відбувається за охолодження у певному температурному інтервалі. Зі зниженням температури дедалі більша кількість аустеніту перетворюється на мартенсит.

Проте навіть при цьому не відбувається повного перетворення всього аустеніту в мартенсит. Частина аустеніту, що не перетворюється, називається залишковим аустенітом. Характерною особливістю мартенситного перетворення є призупинення перетворення у мартенситному інтервалі в разі зупинки безперервного охолодження (ізотермічного видержування), що супроводжується також стабілізацією аустеніту. Хімічний склад аустеніту зумовлює інтервал температур мартенситного перетворення, який знижується в разі підвищення вмісту вуглецю в сталі. Перетворення аустеніту з утворенням мартенситних пластин відбувається з великою швидкістю ( $\approx 1000$  м/с), супроводжується збільшенням об'єму, орієнтованістю структури мартенситу, виникненням напружень та їхнім зростанням зі зростанням мартенситного кристалу. Кристали (пластини) мартенситу орієнтовані до границь зерна аустеніту під кутом  $60^\circ$  або  $120^\circ$ . Для мартенситного перетворення характерно також подрібнення блочної структури, утворення мікро двійників, підвищення густоти дислокацій. Все це, разом з утворенням твердого розчину втілення з тетрагональною кристалічною граткою, зумовлює високу міцність ( $\sigma_v = 1000 \dots 1500$ ) і твердість ( $60 \dots 65$  HRC) мартенситу. Структура мартенситу є результатом гартування сталей.

Усі внутрішні зміни під час пластичної деформації, такі як викривлення кристалічних ґраток, зростання густоти дислокацій та вакансій, зміни макро- і мікроструктури, поява текстури деформації, викликають зміцнення металу. При цьому характеристики міцності ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_T$ , твердість) зростають, а характеристики пластичності – знижуються. Зміцнення металу під дією пластичної деформації називають наклепуванням (нагартуванням). Деформований (наклепаний) метал є термодинамічно нестійким і тому намагається перейти у більш рівноважний стан з меншим рівнем вільної енергії. Процеси, за допомогою яких може відбутися цей перехід, здійснюються шляхом дифузії атомів в металі. Тому вирішальна роль у розвитку цих процесів належить температурі, з підвищенням якої зростає рухливість атомів і спроможність наклепаного металу до самодовільної перебудови структури. При нагріванні такого металу у ньому відбуваються процеси повернення, полігонізації і рекристалізації, які зумовлюють повернення всіх властивостей до рівня властивостей металу до деформації.

Під час нагріву металу до порівняно низьких температур (нижче  $0,8 \dots 0,3 T_{пл}$ ) починається процес повернення. Під цим розуміють підвищення структурної досконалості наклепаного металу внаслідок зменшення густоти дефектів будови, однак без помітних змін структури при спостереженні за допомогою світлого мікроскопа. Розрізняють дві стадії цього процесу: перша стадія – повернення – протікає за температур нижче  $0,2 T_{пл}$ , коли відбувається зменшення кількості точкових дефектів (вакансій) і невелике перегруповання дислокацій без утворення нових субграниць; друга стадія – полігонізація (від лат. *polygon* - багатокутник) – реалізується при нагріванні до більш високих температур ( $0,25 \dots 0,3 T_{пл}$ ). Під цим розуміють фрагментацію кристалів на субзерна (полігони) з мало кутовими границями. Субзерна при подальшому підвищенні температури або тривалості нагріву прагнуть до зростання. Нагрівання до більш високої температури призводить до різкої зміни структури і властивостей деформованого металу внаслідок рекристалізації – процесу виникнення і росту нових недеформованих зерен. Внаслідок рекристалізації наклепування практично цілком знімається і властивості металу наближаються до вихідних. Найменшу температуру початку рекристалізації  $T_p$ , за якої

протікає рекристалізація і відбувається знеміцнення наклепаного металу, називають температурним порогом рекристалізації. Ця температура не є постійною фізичною величиною. Температурний поріг рекристалізації знижується відповідно ступеню деформації, тривалості нагріву, величини зерна до деформації. Для технічно чистих металів він складає  $0,4 T_{пл}$ , для чистих знижується до  $0,1...0,2 T_{пл}$ , а для сплавів твердих розчинів зростає до  $0,5...0,6 T_{пл}$ .

Із завершенням первинної рекристалізації у процесі подальшого нагріву відбувається збиральна рекристалізація. Це процес росту одних рекристалізованих зерен за рахунок інших (сусідніх) рекристалізованих зерен. У реальному металі після первинної рекристалізації зерна мають неоднакові розміри. Границі зерен викривлені, мають підвищену протяжність. Внаслідок збиральної рекристалізації зерна зростають рівномірно, більш крупні ростуть за рахунок дрібних.

За певних умов зерна можуть зростати нерівномірно, тому що ростуть і досягають великих розмірів лише окремі з них, тоді як основна структура зберігається дрібнозернистою. Такий процес називають вторинною рекристалізацією. Чим більший ступінь попередньої пластичної деформації, тим менший розмір рекристалізованого зерна. Температура та тривалість нагріву також впливають на розмір рекристалізованого зерна.

Під час нагрівання пластично деформованого металу змінюються також його структура та властивості. В інтервалі температур повернення спостерігається незначне знеміцнення, яке залежить від природи металу і фактичної температури нагріву. Характеристики пластичності дещо підвищуються. В області температур первинної рекристалізації різко знижуються показники міцності та значно підвищується пластичність. Первинна рекристалізація призводить до повного зняття наклепування. Починаючи з певної температури, пластичність плавно знижується, що пояснюють утворенням великого зерна внаслідок збиральної рекристалізації. На практиці для повного зняття наклепування застосовують термічну обробку за режимом рекристалізаційного відпалу.

### Контрольні запитання

1. Що таке термічна обробка, її основні параметри?
2. Назвіть основні перетворення, які відбуваються при нагріванні і охолодженні сталі.
3. Які основні структури можуть утворюватися при термічній обробці сталі?
4. Що таке внутрішні напруження?
5. Що таке наклепування металу?
6. Що таке температурний поріг рекристалізації?
7. Який процес називають вторинною рекристалізацією?
8. Яку термічну обробку застосовують для повного зняття наклепування?