

Лекція 6

ТЕОРІЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ.

1. [Перетворення перліто-карбідної структури в аустеніт при нагріванні.](#)
2. [Вплив температури на розмір зерна аустеніту при нагріванні.](#)
3. [Перлітне перетворення. Механічні властивості сталей зі структурами: перліт, сорбіт, тростит.](#)
4. [Мартенситне перетворення.](#)
5. [Природа, механізм та кінетика перетворення.](#)
6. [Властивості мартенситу. Перетворення мартенситу при нагріванні.](#)

1. Перетворення перліто-карбідної структури в аустеніт при нагріванні.

Фазові перетворення в металах і сплавах відбуваються внаслідок зміни умов (наприклад, температури), коли один стан системи стає більш стабільним, внаслідок зменшення вільної енергії (ΔG_1), за іншим, який має більшу вільну енергію (ΔG_2), тобто $\Delta G_1 < \Delta G_2$.

При нагріванні сталі вище за температуру критичної точки A_1 (727°C , лінія PSK) (рис. 51) відбувається *перетворення перліту в аустеніт* ($P \rightarrow A$). В інтервалі температур $740\text{--}800^\circ\text{C}$, на межі фериту і цементиту, починається перетворення фериту в аустеніт з утворенням низьковуглецевого аустеніту, в якому розчинюється цементит (рис. 52, а, б, в).

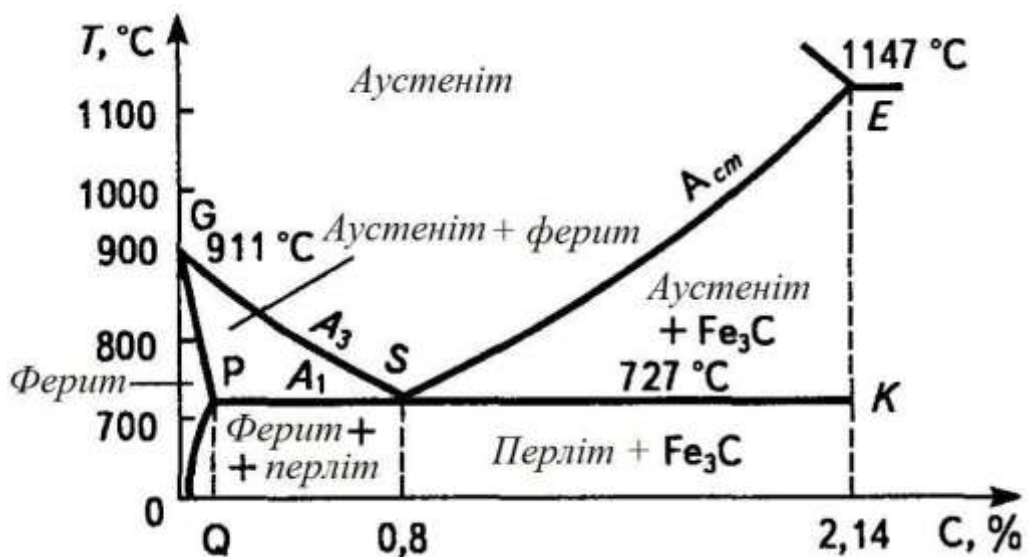


Рис. 51. Сталева ділянка діаграми стану Fe — Fe₃C

Перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ відбувається швидше, ніж розчинення цементиту. Тому, коли вся α -фаза (ферит) перетвориться на γ -фазу (аустеніт), частина цементиту залишиться нерозчиненою (рис. 52, д), і лише після розчинення всього цементиту перетворення закінчується (рис. 52, е). 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 (перерозподілу) вуглецю аустеніт стає однорідним.

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

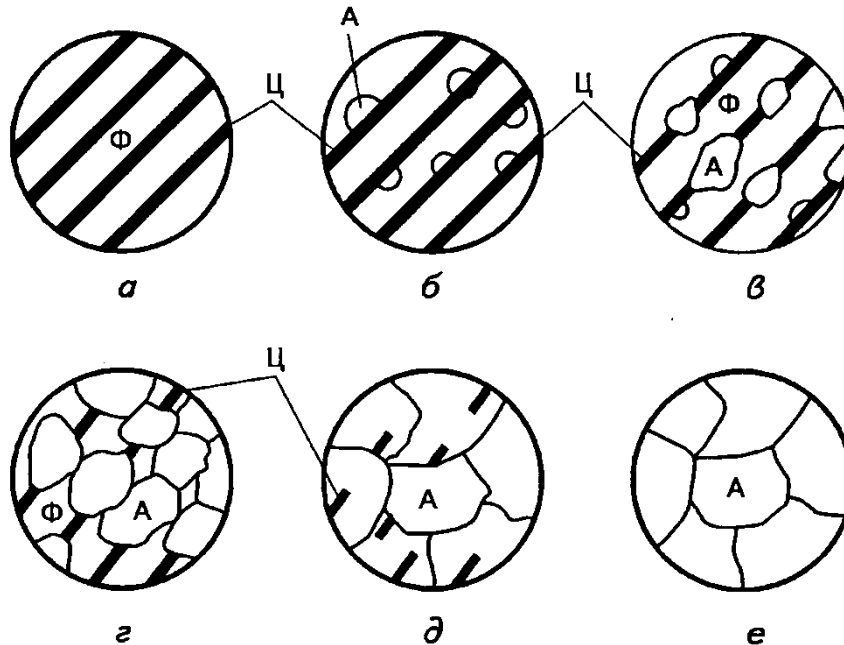


Рис. 52. Схема утворення зерен аустеніту під час перетворення перліту при нагріванні сталі

У разі нагрівання заевтектоїдних сталей вище A_1 (подібно доевтектоїдних) 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.

У нерівноважних (виробничих) умовах нагрівання (на відміну від розглянутих рівноважних) температура перетворення перліту в аустеніт перевищує A_1 , про що засвідчує діаграма ізотермічного перетворення (рис. 53), яка побудована в координатах температура t - час τ .

Температури та час початку перетворення перліту в аустеніт позначаються лінією I, а закінчення - лінією II. Лівише лінії I існує перліт, правіше лінії II - аустеніт, а між цими лініями - перліт + аустеніт.

При найменшій швидкості нагрівання v_1 відбувається незначне перегрівання перліту відносно A_1 і спостерігається велика тривалість до початку перетворення перліту в аустеніт (відрізок часу між віссю ординат і точкою 1). Закінчується перетворення в точці 2.

Зі збільшенням швидкості нагрівання до v_2 , а згодом і до v_3 температура перетворення істотно зростає, а тривалість процесу зменшується. Криві I і II з часом наближаються до критичної

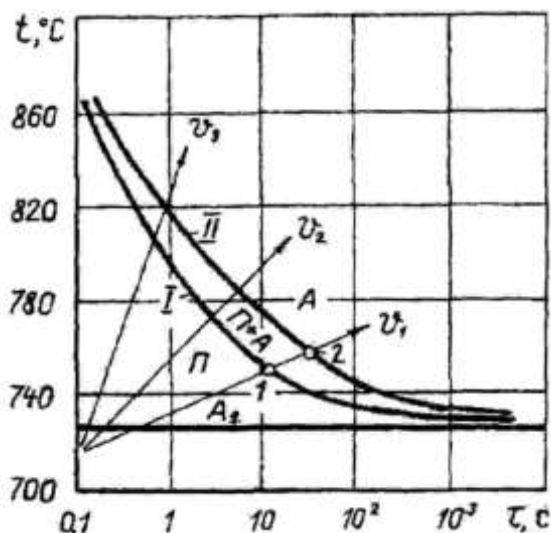


Рис. 53. Діаграма ізотермічного перетворення (при постійній температурі) перліту в аустеніт (сталь евтектоїдна):
I і II відповідно початок і кінець перетворення перліту (П) в аустеніт (A);
1,2 - точка початку й кінця перетворення перліту в аустеніт; v_1, v_2, v_3 - швидкість нагрівання

температури A_1 . Збіжність кривих початку й кінця перетворення з критичною температурою A_1 , відповідає рівноважному перетворенню перліту. Після повного розпаду перліту вуглець нерівномірно розподілений в зернах аустеніту. Його більше там, де перед тим були пластинки (зерна) цементиту. Дифузія (рух та перерозподіл) вуглецю поступово вирівнює склад аустеніту.

[На початок](#)

2. Вплив температури на розмір зерна аустеніту при нагріванні.

Зародки майбутніх зерен аустеніту виникають у перлітних колоніях на границях між феритом й цементитом. Оскільки в кожній колонії зароджується декілька центрів нових кристалів, то розпад перліту супроводжується подрібненням зерен аустеніту. Їх розмір наприкінці перетворення перліту в аустеніт визначає величину початкового зерна аустеніту d_A (рис. 54). Подальше підвищення температури нагрівання й тривалості витримки в однофазовій аустенітній області обумовлює ріст зерен аустеніту. Залежно від схильності зерен аустеніту до росту під час нагрівання сталі поділяють на спадково *дрібнозернисті* та спадково *крупнозернисті*.

У спадково дрібнозернистих сталях при нагріванні до 950 - 1000 °С зерна незначно ростуть (крива I), а подальше підвищення температури інтенсифікує цей ріст. Швидкість росту зерен аустеніту залежить від способу розкислення та наявності в сталі легувальних елементів. Сталі, розкислені алюмінієм, мало схильні до росту зерна при нагріванні до температур 950-1000°С. Це спричиняють дисперсні частинки нітриду алюмінію AlN, які розташовані по границях зерен аустеніту. При температурі понад 1000 °С після розчинення нітридів алюмінію зникають перешкоди для росту зерна. Такі елементи, як V, Ti, Mo, W утворюють карбіди та нітриди і також гальмують ріст зерна. Чим більш дисперсні карбіди та нітриди, тим більш дисперсні утворюються зерна аустеніту.

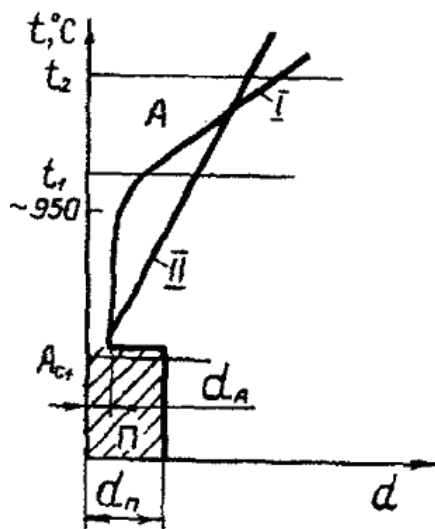


Рис. 54. Вплив температури нагрівання t на величину зерна d аустеніту спадково дрібно - (I) і крупнозернистої (II) сталі:

d_A - розмір початкового зерна аустеніту (A);

d_n - розмір вихідного зерна перліту (П)

У спадково - крупнозернистих сталях зерна ростуть навіть після незначного перегрівання (крива II). Марганець і фосфор сприяють росту зерен. Сталі, розкислені лише феромарганцем, або феромарганцем й феросиліцієм, належать до спадково - крупнозернистих.

На практиці розміри зерен аустеніту визначають цементацією (насиченням вуглецем), окисленням або протравлюванням границь зерен спеціальними травниками і співставленням одержаних структур зі стандартними шкалами бальності.

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

Необґрунтовано вибраний режим нагрівання може призвести до надмірного росту зерна, що називають *перегріванням*. Перегріта сталь характеризується наявністю великих зерен фериту і перліту. Іноді феритні виділення мають вигляд голок - така структура називається відманштеттовою. Нагрівання сталі до температур, близьких до лінії солідус, супроводжується оплавленням і окисленням границь зерен, що називається *перепалюванням*.

[На початок](#)

3. Перлітне перетворення. Механічні властивості сталей зі структурами: перліт, сорбіт, тростит.

Перетворення аустеніту на перліт ($A \rightarrow П$) відбувається дифузійним механізмом при незначному переохолодженні і складається з трьох основних етапів: перетворення $Fe\gamma \rightarrow Fe\alpha$ (ГЦК $\rightarrow$ ОЦК-гратка); зародження центрів кристалізації цементиту (Fe_3C); зростання зерен цементиту. Внаслідок цих процесів відбувається утворення і зростання пластинчастих кристалів фериту і цементиту, що утворюють перлітні колонії (рис. 57).

При збільшенні ступеню переохолодження аустеніт внаслідок дифузійного розпаду перетворюється на *сорбіт*, а при ще більшому - на

троостит (рис. 56). Сорбіт і троостит є сумішами фериту та пластин цементиту, більш дисперсними ніж перліт.

[На початок](#)

4. Мартенситне перетворення.

При швидкому переохолодженні нижче 240 °С та витримці відбувається бездифузійне *мартенситне перетворення*. Лінії M_n і M_s на рис. 56 показують температури початку та закінчення мартенситного перетворення.

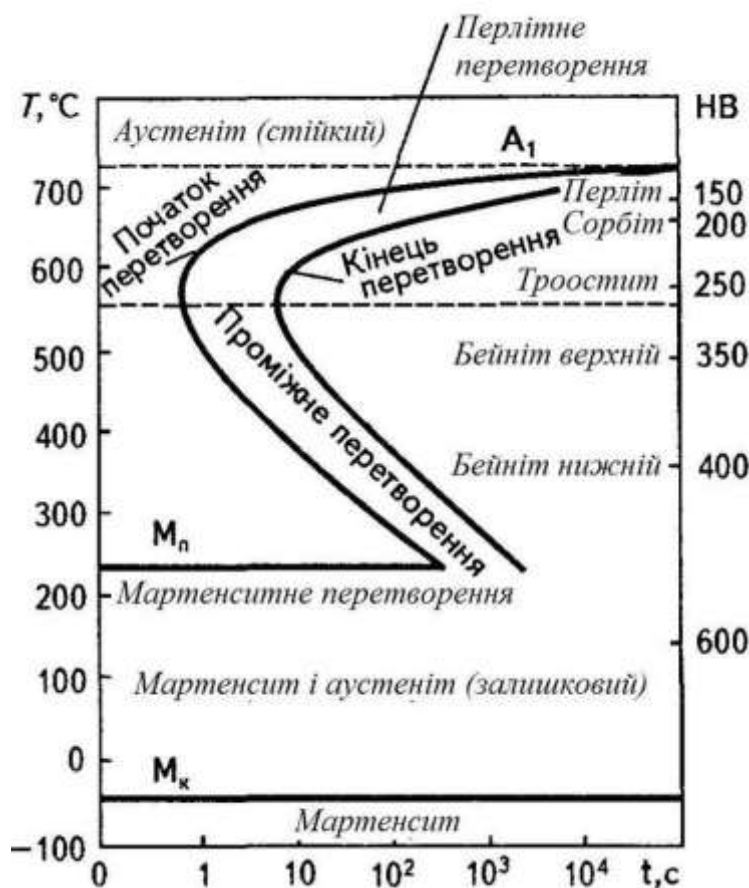


Рис. 56. Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі (0,8 % С)

Особливістю перетворення аустеніту в мартенсит ($A \rightarrow M$) є його бездифузійність. *Мартенсит* - це перенасичений твердий розчин вуглецю в α -залізі. При значному переохолодженні вуглець не встигає виділитися з аустеніту у вигляді цементиту, як це відбувається при утворенні перліту, сорбіту і трооститу. Він залишається у кристалічній ґратці α -заліза, утворюючи перенасичений твердий розчин і викликає внаслідок цього зміну ОЦК-ґратки на тетрагональну у вигляді прямокутного паралелепіпеда (рис. 58).

[На початок](#)

5. Природа, механізм та кінетика перетворення.

Перетворення аустеніту в мартенсит відбувається за механізмом зсуву, коли атоми заліза зсуваються в просторі на незначні (менші міжатомних) відстані відносно сусідніх атомів без обміну місцями.

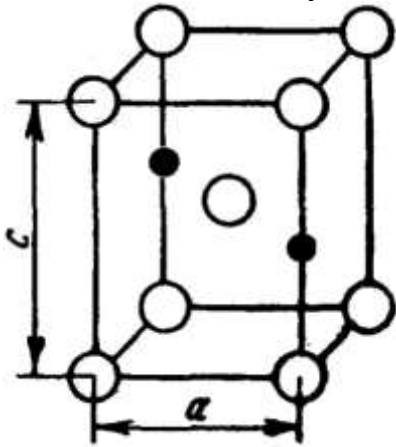


Рис. 58. Елементарна кристалічна гратка мартенситу:
 a, c - параметри гратки;
О - атом заліза;
• - атом вуглецю

У результаті такого зсуву відбувається миттєве $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення з величезною швидкістю (~ 1000 м/с) росту кожної пластини мартенситу.

Аустеніт починає перетворюватися в мартенсит з певної початкової температури M_p (рис. 56), яка не залежить від швидкості охолодження, протилежно до перлітного перетворення. Якщо припинити охолодження, то мартенситне перетворення зупиниться. Закінчується мартенситне перетворення при кінцевій температурі M_k (рис. 56). Якщо в рівноважному стані концентрація вуглецю у фериті не перевищує 0,02 %, то концентрація вуглецю в мартенситі така сама, як у вихідному аустеніті й може досягати 2,14 %.

Атоми вуглецю мартенситу перебувають в порах елементарної гратки α -заліза й сильно деформують її. В результаті елементарна гратка мартенситу замість кубічної стає тетрагональною (рис. 58), в якій параметр c більший від a . З підвищенням вмісту вуглецю параметр c тетрагональної гратки збільшується. Водночас збільшується й ступінь тетрагональності (співвідношення c/a). Наприклад, при вмісті у сталі 1,7 % С ступінь тетрагональності становить 1,08.

Кристали (голки) мартенситу в площині шліфа виглядають, як паралельні або розташовані під кутом 60 і 120 ° пластини, що пов'язано з утворенням мартенситу лише в певних кристалографічних площинах. По цих площинах кристал мартенситу, що росте, й кристал вихідного аустеніту спряжені (когерентні).

Оскільки мартенсит та аустеніт мають різні питомі об'єми, то в площинах спряження виникають напруження, що перевищують границю текучості. Ці напруження спричиняють порушення когерентності й утворення міжфазової границі з невідповідним розташуванням атомів. Характерно також подібнення блочної структури та підвищення густоти дислокацій.

[На початок](#)

6. Властивості мартенситу. Перетворення мартенситу при нагріванні.

Все це, разом з утворенням твердого розчину втілення з тетрагональною кристалічною граткою, зумовлює високу міцність ($\sigma_v \approx 1000$ - 1500 МПа),

твердість (60-65 HRC) і крихкість (ударна в'язкість знижується до 0,1 МДж/м²) мартенситу.



Рис. 58. Структура мартенситу, х 1000

Кінетику мартенситного перетворення в інтервалі температур $M_{\text{п}}$ - $M_{\text{к}}$ часто відображають кривою, побудованою в координатах частка мартенситу — температура t (рис. 60). Як видно з рисунка, зі зниженням температури сталі частка утвореного мартенситу збільшується. При цьому частка мартенситу збільшується не внаслідок росту кристалів, а через утворення нових. При кінцевій температурі мартенситного перетворення $M_{\text{к}}$

ще залишається певна кількість не перетвореного аустеніту (А), який називають *залишковим аустенітом*. Чим нижча температура $M_{\text{к}}$, тим більше його в загартованій сталі. Залишковий аустеніт є причиною неоднорідності властивостей загартованої сталі.

На числові значення температур $M_{\text{п}}$ і $M_{\text{к}}$ істотно впливає хімічний склад аустеніту. Чим більша концентрація вуглецю, тим нижчий інтервал температур мартенситного перетворення (рис. 61). Всі елементи, за винятком кобальту й алюмінію, знижують положення точок $M_{\text{п}}$ і $M_{\text{к}}$, збільшують стійкість переохолодженого аустеніту, тобто змішують С-подібні криві на діаграмі вправо і, таким чином, зменшують швидкість охолодження, потрібну для утворення мартенситної структури.

Мартенситне перетворення на відміну від перлітного не має інкубаційного періоду. При концентрації вуглецю понад 0,5 % мартенситне перетворення зсувається в область від'ємних температур.

Температура мартенситного перетворення $M_{\text{п}}$ не залежить від швидкості охолодження. Для евтектоїдної вуглецевої сталі вона становить 240 °С.

Мінімальна швидкість охолодження, при якій у сталі відбувається мартенситне перетворення, називається *критичною швидкістю охолодження*.

Для вуглецевої евтектоїдної сталі точка $M_{\text{к}}$ відповідає температурі мінус 50 °С, тому при охолодженні до кімнатної температури перетворення аустеніту в мартенсит в цій сталі повністю не завершується і в її структурі поряд із мартенситом є аустеніт, що не розпався. Такий аустеніт називають *залишковим*. У вуглецевих сталях масова частка залишкового аустеніту становить 3-10%, а в легованих досягає десятків процентів. Оскільки залишковий аустеніт значно м'якший за мартенсит, то він зменшує твердість загартованої сталі. Тому для досягнення більш повного мартенситного перетворення сталь з великим вмістом залишкового аустеніту після гартування додатково обробляють холодом, тобто охолоджують до температури, нижчої за точку $M_{\text{к}}$.

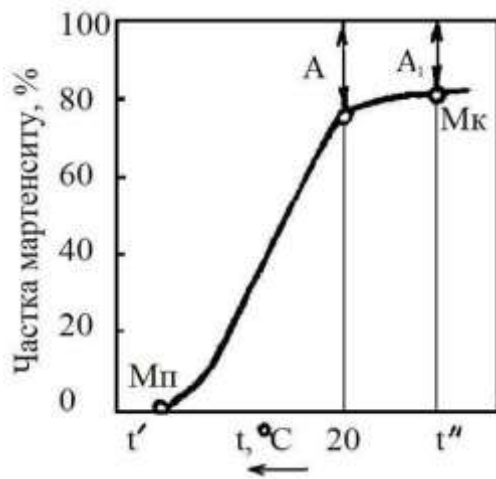


Рис. 60. Мартенситна крива:
t – температура

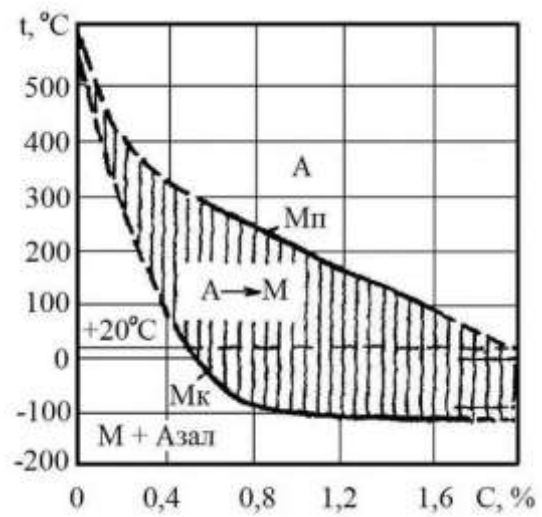


Рис. 61. Вплив C на температури початку
Mп й кінця Mк мартенситного перетворення

[На початок](#)