

Перетворення в сталі при нагріванні до аустенітного стану та наступному охолодженні

Технологія металів складається з трьох основних видів: металургія – отримання металів заданого складу; механічна обробка – отримання виробів заданої форми; термічна обробка – отримання заданих властивостей.

1. Температура і час

Мета будь-якого процесу термічної обробки у тому, щоб нагріванням до певної температури і наступним охолодженням викликати бажані зміни будови металу (рис. 1).

Основні фактори впливу при термічній обробці є температура і час, тому режим будь-якої термічної обробки можна представити графічно в координатах температури t і часу τ .

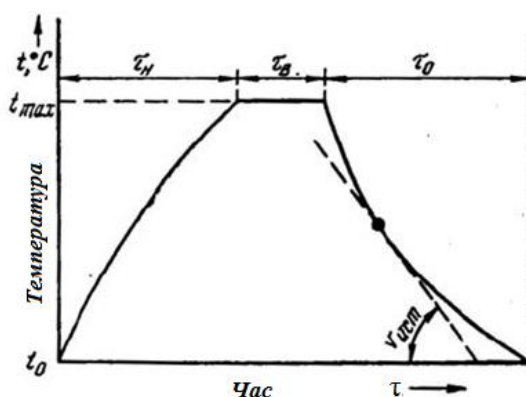


Рис. 1 – Схематичне зображення простої термічної обробки

Режим термообробки можна охарактеризувати параметрами: температура нагрівання $t_{\max}$ – максимальна температура, до якої був нагрітий сплав, час витримки $\tau_{\text{в}}$, швидкість нагрівання $v_{\text{н}} = \frac{dt}{d\tau_{\text{н}}}$, швидкість охолодження $v_{\text{о}} = \frac{dt}{d\tau_{\text{о}}}$.

2. Основні види термічної обробки сталі

При термічному обробленні в сплаві повинні відбутися незворотні зміни структури. Всі види термообробки розділені на групи:

1) Відпал – термічна операція, що полягає в нагріванні металу, що знаходиться в нерівноважному стані, і переведення його в більш рівноважний стан.

2) Гартування – нагрівання сплаву до температури вище фазових перетворень і наступне швидке охолодження з метою переведення в нерівноважний стан.

3) Відпуск – термічна операція нагрівання загартованої сталі до температур нижче фазових перетворень для переведення його в більш рівноважний стан.

Всі ці перетворення в групах пов'язані з діаграмами стану, у яких є перетворення у твердому стані; поліморфні, евтектоїдні перетворення, обмежена розчинність твердих фаз (див. діаграму стану Fe-C).

Для сталей ця частина діаграми стану Fe-C з концентрацією вуглецю до точки E (2,11% C), називається «сталлю» частиною діаграми (рис. 2).

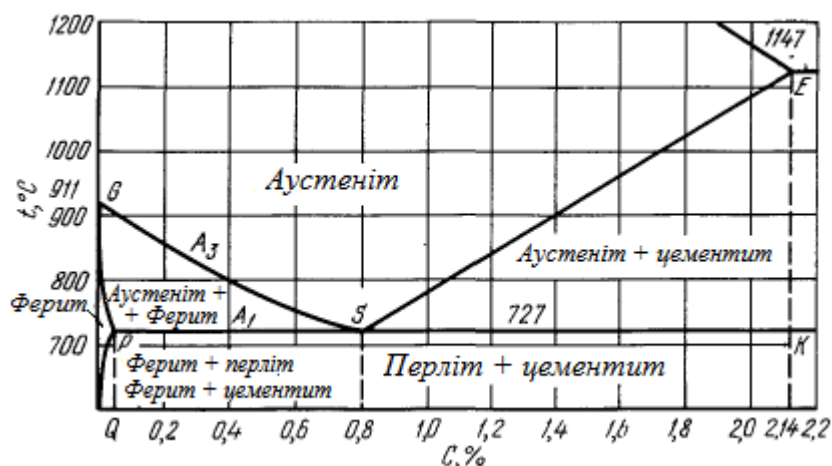


Рис. 2 – «Стальна» частина діаграми Fe-C цементит

Наведемо загальноприйняті позначення на діаграмі. Температури, точки, в яких відбуваються фазові перетворення, називаються критичними. У теорії термічного оброблення ці точки позначаються буквою *A*. Нижня критична точка, що на лінії PSK, позначається буквою A_1 і відповідає перетворенню аустеніт $\leftrightarrow$ перліт. Верхня критична точка A_3 лежить на лінії GSE і відповідає випаданню кристалів фериту за рахунок поліморфного перетворення у

доевтектоїдній сталі (GS) або цементиту вторинного (SE) у заевтектоїдній сталі. При охолодженні ці точки позначають A_{r1} , при нагріванні A_{c1} і A_{r3} і A_{c3} відповідно.

Відпал – фазова перекристалізація, що полягає в нагріванні вище A_{c3} з подальшим повільним охолодженням. Якщо нагрівання проводиться в інтервалі температур $A_{c1} - A_{c3}$, такий відпал називається неповним. При відпалі структура сталей – рівноважна $\Phi + \Pi$, Π , $\Pi + \text{Ц}$ (після охолодження).

Якщо охолодження сталей проводити на повітрі, то така обробка буде називатися нормалізацією.

Гартування – нагрівання вище температур A_{c3} з наступним швидким охолодженням. Нагрівання в інтервалі температур $A_{c1} - A_{c3}$ і подальше швидке охолодження називається неповним гартуванням. Відпуск – нагрівання загартованої сталі нижче A_{c1} . Можливі також інші види термічного оброблення (хіміко-термічна обробка) – цементація, азотування тощо; а також термомеханічна обробка.

3. Чотири основні перетворення в сталі.

Фазові перетворення в сталях відбуваються у зв'язку зі зміною вільної енергії. Для сталей характерні наступні структури:

Аустеніт (А) – твердий розчин вуглецю в γ -залізі $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$;

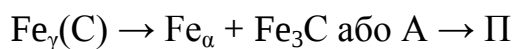
Мартенсит (М) – пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$;

Перліт (П) – евтектоїдна суміш, яка складається з фериту і цементиту, що одночасно утворюються з аустеніту.

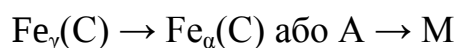
I. Перетворення перліту в аустеніт відбувається вище температури A_1 , коли аустеніт має меншу вільну енергію:



II. Перетворення аустеніту в перліт відбувається нижче A_1 :



III. Перетворення аустеніту в мартенсит:



IV. Перетворення мартенситу в перліт:

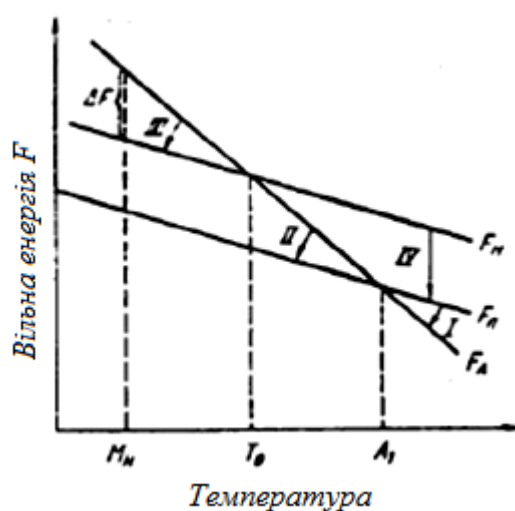
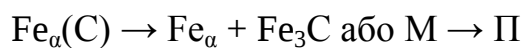


Рис. 3. – Зміна вільних енергій аустеніту (F_A), мартенситу (F_M), перліту ($F_П$) в залежності від температури

4. Перше основне перетворення в сталі, $\text{П} \rightarrow \text{A}$ при нагріванні

Під теорією термічного оброблення розуміють опис процесів формування структур як в рівноважних, так і в нерівноважних станах. Для вивчення перетворень обирають модельні сталі евтектоїдного складу 0,8% С з вихідною структурою Ф – Ц. Перетворення $\text{П} \rightarrow \text{A}$ в повній відповідності з діаграмою стану може відбуватися тільки при дуже повільному нагріванні. Перенагрітий перліт залежно від ступеня перегріву з різними швидкостями перетворюється на аустеніт (рис. 4).

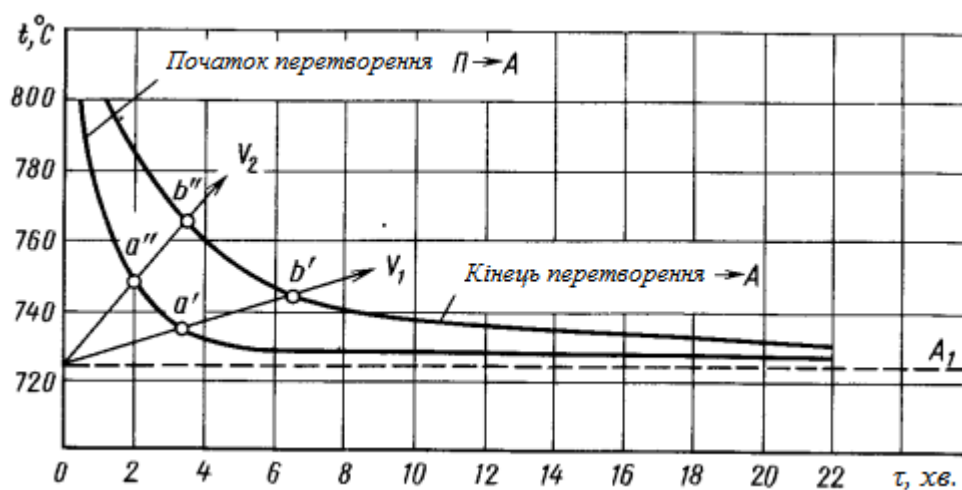


Рис. 4 – Перетворення перліту (П) в аустеніт (А) при нагріванні

Промені V_1 і V_2 характеризують швидкості нагрівання при перетворенні $\Pi \rightarrow A$. При швидкості нагрівання V_2 (780 °C) перетворення $\Pi \rightarrow A$ пройде за дві хвилини, а при V_1 (740 °C) перетворення пройде за вісім хвилин. Точки a'' і b'' відповідають початку і кінцю перетворення.

Із зменшенням швидкості нагрівання перетворення $\Pi \rightarrow A$ зміщується в області більш низьких температур (727 °C).

Початок перлітно-аустенітного перетворення супроводжується утворенням зерен аустеніту на межі розділу ферит-цементит – структурними складовими перліту (в 1см³ перліту – поверхні розділу кілька десятків квадратних метрів). Закінчення процесу перетворення характеризується утворенням аустеніту (рис. 5).

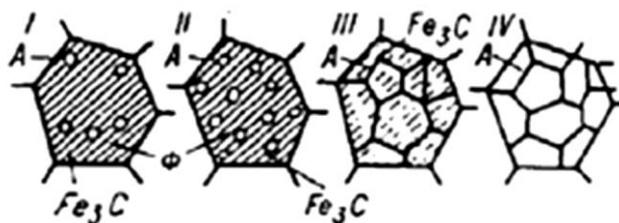


Рис. 5 – Стадії формування аустенітних зерен

На перших стадіях аустеніт неоднорідний за складом: більше вуглецю там, де були зерна цементиту. Поступово, коли дифузійні процеси завершуються, склад аустеніту вирівнюється. Така процедура називається гомогенізацією. Подальше нагрівання або витримка викликає зростання аустенітного зерна (рис. 6). У спадково грубозернистих (СГЗ) сталях розмір аустенітних зерен зростає швидше, ніж у СДЗ. Розмір зерна аустеніту відіграє визначальну роль у формуванні механічних властивостей: у СГЗ – великі зерна перліту – невисокі механічні властивості (рис. 7).

Розміри зерен аустеніту згідно з ГОСТом оцінюються за восьмибальною шкалою: чим менше бал зерна, тим грубіше зерно аустеніту (згодом – перліту).

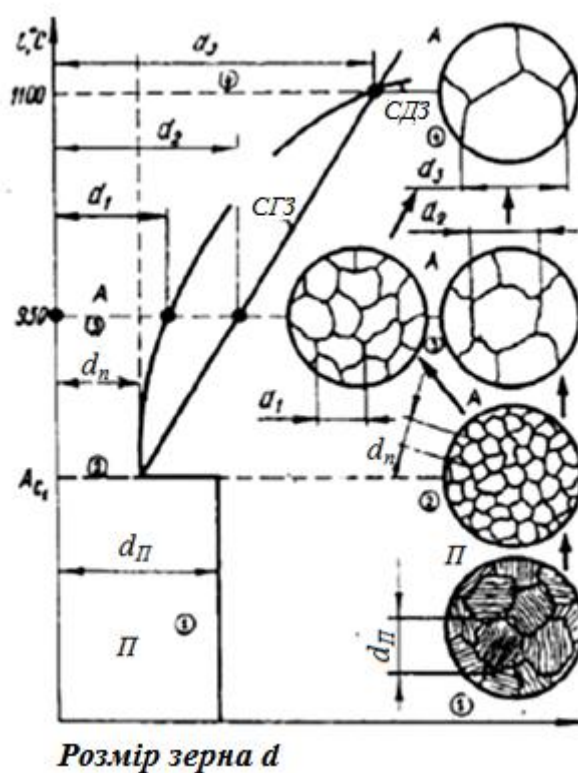


Рис. 6 – Схема росту зерен аустеніту: Π – перлітні зерна; A – аустенітні; d_{Π} – розмір зерна перліту; d_n – початкові зерна аустеніту; d_1, d_2, d_3 – розміри зерна аустеніту; 1, 2, 3, 4 – стадії нагрівання аустеніту; СГЗ – спадково грубозерниста сталь; СДС – спадково дрібнозерниста сталь.

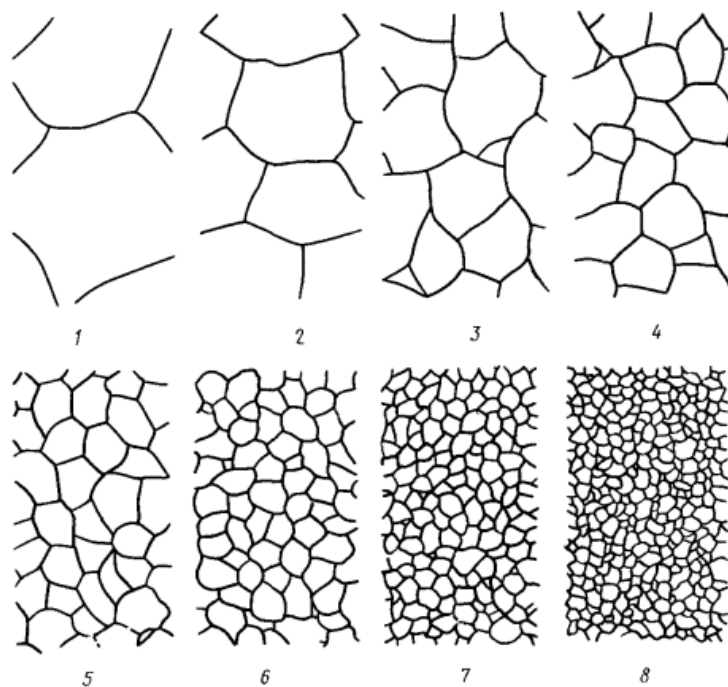


Рис. 7 – Бальна оцінка розмірів зерна аустеніту, $\times 100$.

5. Друге основне перетворення сталі при охолодженні (розпад аустеніту)

Перетворення полягає в розпаді твердого розчину вуглецю в γ -залізі (аустеніту) на α -залізо (ферит) і на карбід заліза (цементит). Перетворення починається нижче точки A_1 (рис. 8), коли вільна енергія ($\Phi + \Pi$) суміші менше, ніж у аустеніту. З одного боку, чим нижче температура, тим більше різниці вільної енергії, тим більше стимул для швидкості перетворення аустеніт $\rightarrow$ перліт. З іншого боку, перетворення супроводжується утворенням різних за складом фаз $\Phi - \Pi$, яке супроводжується дифузією, на що потрібен час. Тому два цих чинника: термодинамічний (ΔF) і кінетичний (дифузія) вступають в протиріччя і призводять до складного характеру перетворення.

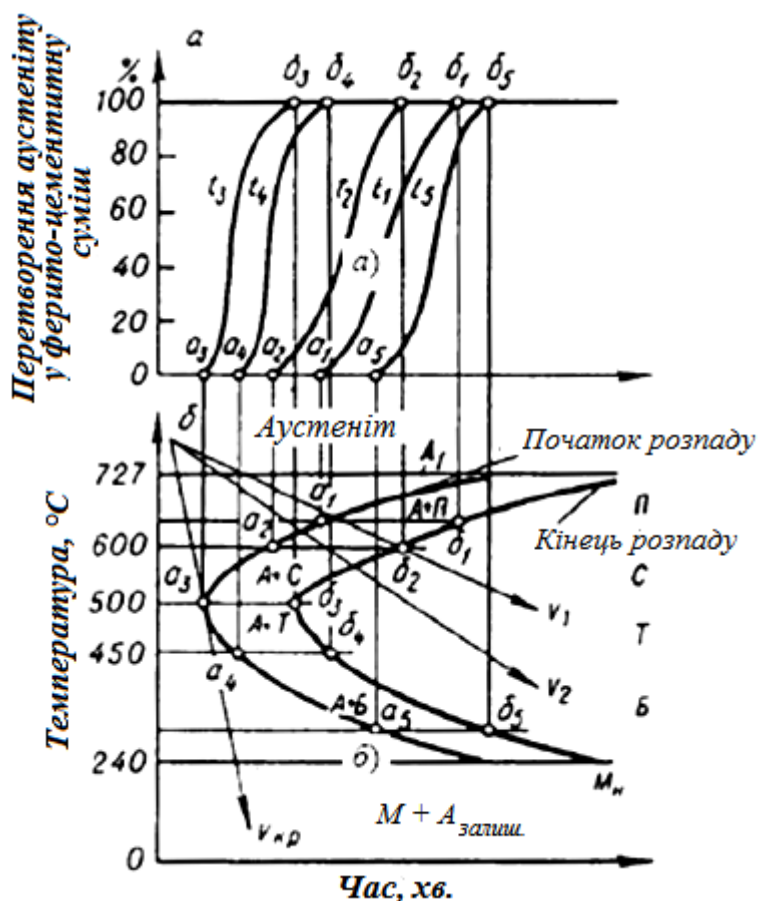


Рис. 8 – Кінетика розпаду: a – аустеніту; b – С-подібна крива

На рис. 8, а точки $a_1 - a_5$ – точки початку розпаду аустеніту при температурах ізотермічного перетворення $t_1 - t_5$. точки $\delta_1 - \delta_5$ – кінець розпаду

аустеніту при тих же температурах. Ці точки, спроектовані на відповідні температури t (рис. 8, б), вказують початок і кінець перетворення аустеніту в перліт. Вони нагадують форму літери «С» і називаються С-подібними кривими розпаду аустеніту в ізотермічних умовах. Тут же наведені промені швидкостей охолодження V_1 , V_2 , $V_{кр}$. При різних переохолодженнях аустеніту утворюються різні за ступенем дисперсності ферито-карбідні суміші: П – перліт, С – сорбіт, Т – троостит, Б – бейніт. При переохолодженні $V_{кр}$ аустеніт зазнає перетворення за бездифузійним механізмом, утворюючи мартенсит. Дифузійне перетворення $A \rightarrow П$ пов'язане з утворенням нових кристалів фериту і цементиту пластинчастої форми. Причому, чим вище ступінь переохолодження, тим дрібніше кристали фериту і цементиту: більші в перліті, найдрібніші в трооститі. Механізм зростання перлітної колонії наведений на схемі (рис. 9).

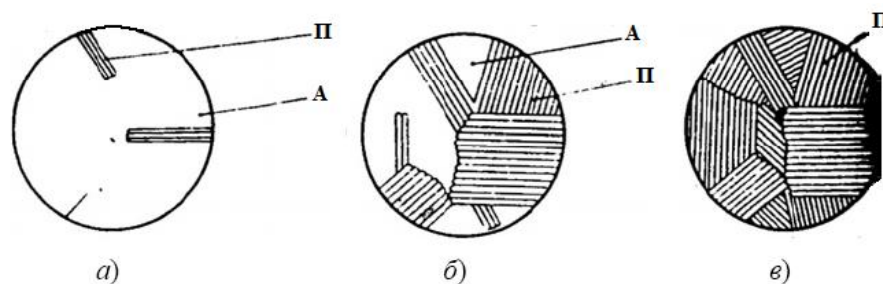


Рис. 9 – Ріст кристалів фериту і цементиту: а – початок утворення кристалів фериту і цементиту; б – проміжна стадія; в – кінцева стадія; А – аустеніт; П – перліт

Кристалізаційний характер перетворення, коли дифузія «С» і «Fe» можлива (це відбувається в районі температур 727 ... 500 °С) призводить до утворення сумішей (Ф + Ц) різного ступеня дисперсності (рис. 10). Найбільш великі пластини (Ф + Ц) в перліті, переохолодження ≈ 700 °С, потім – у сорбіті – більш дрібні при переохолодженні ≈ 600 °С, найдрібніші кристали у трооститу при переохолодженні ≈ 500 °С. Розмір Ф + Ц пластин, тобто дисперсність суміші, впливає на твердість сталі: у перліту НВ = 150, у сорбіту НВ = 200, у трооститу НВ = 250. Таким переохолодженням користуються при термічному

обробленні для отримання різних механічних властивостей у сталях одного і того ж складу.

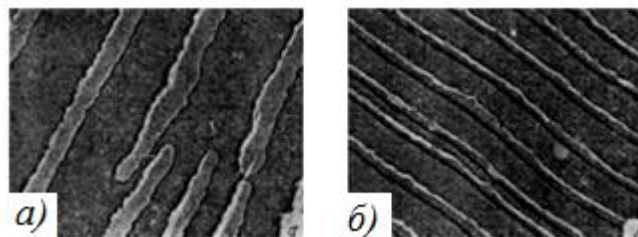


Рис. 10 – Вплив ступеня переохолодження на характер фериту цементитних сумішей: *а* – сорбіт, *б* – троостит; збільшення в 10^4 разів електронний мікроскоп

6. Третє перетворення в сталі ($A \rightarrow M$) (мартенситне)

Якщо швидкість охолодження з температур вище A_{C3} перевищує критичну, при цьому пригнічується дифузія, то перетворення стає мартенситним. Мартенсит у вуглецевій сталі – пересичений твердий розчин вуглецю в Fe_α . Його зараз поширюють не тільки на вуглецеві сталі, але і на Ti, Fe, Co, Fe-Ni сплави.

Характерні особливості мартенситного перетворення:

1. Воно є бездифузійним, так як концентрація вуглецю в (М) така ж, як у вихідному (А).
2. Механізм $A \rightarrow M$ перетворення носить зсувний характер, тому напруження, що виникають при охолодженні є визначальними для кінетики мартенситного перетворення.
3. Незважаючи на те, що в бездифузійному перетворенні атоми зміщуються на відстань менше одного параметру ґратки, сумарні ж значення переміщень в межах об'єму металу приймають макроскопічні розміри. Це призводить до утворення рельєфу на полірованій поверхні шліфа, як при пластичній деформації.

4. Кристалічна ґратка мартенситу не кубічна, а тетрагональна, $c/a > 1$ (рис.11).

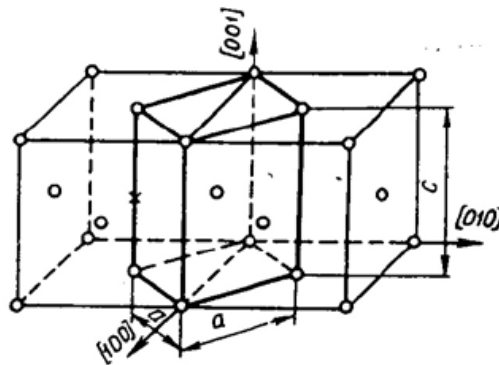


Рис. 11 – Схема перетворення

$A \rightarrow M$. Світлі атоми – розташування атомів заліза. Тонкі лінії – дві кристалічні ґратки аустеніту; жирні лінії – кристалічна ґратка мартенситу; $\times$ - атом вуглецю; a і c – параметри ґратки мартенситу; $[010]$ – напрям у ґратці мартенситу

5. Між кристалічними ґратками аустеніту і мартенситу спостерігається певна кристалографічна відповідність.

6. Найбільш типовою формою мартенситного кристалу є лінза або пластина з малим відношенням товщини до інших лінійних розмірів (рис. 12).



Рис. 12 – Структура мартенситу, $\times 1000$

7. Час утворення одного кристалу мартенситу 10^{-7} с, а швидкість росту близька до швидкості звуку.

8. Перетворення $A \rightarrow M$ протікає в певному температурному інтервалі: M_H – початок, M_K – кінець перетворення. при даній температурі t утворюється тільки певна кількість мартенситу.

9. Мартенситні точки залежать від хімічного складу сталі (рис. 13).

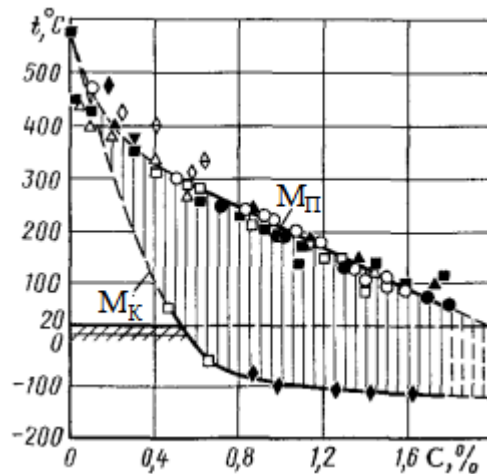


Рис. 13 – Положення точок початку (M_n) і кінця (M_k) мартенситного перетворення від вмісту вуглецю

10. Перетворення не завжди йде до кінця, залишається невитраченим аустеніт – залишковий.

11. Прикладення деформацій викликає відновлення мартенситного перетворення і призводить до зниження залишкового аустеніту. Існує два основних типи мартенситу: пластинчастий (двійниковий) і рейковий (дислокаційний).

7. Проміжне бейнітне перетворення.

Бейнітне перетворення проходить між температурами дифузійного перлітного ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) і бездифузійного мартенситного ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$). При цих температурах дифузія атомів Fe вже не йде, а дифузія вуглецю ще пригнічена. Зазвичай бейніти поділяють на верхній і нижній (рис. 14). На фотографії верхнього бейніту видно світлі ділянки цементиту в темних кристалах мартенситу.



Рис. 14 – Будова бейніту;електронний мікроскоп, $\times 4000$

8. Четверте основне перетворення при відпуску загартованої сталі (М→П).

Структури загартованої сталі – мартенсит і залишковий аустеніт. Обидві вони нерівноважні. У результаті нагрівання загартованої сталі до температури $< A_1$ метастабільні структури починають послідовно розподілятися на більш рівноважні фази.

Цілком четверте перетворення умовно розбивається на чотири температурні етапи: I, II, III, IV (рис. 15).

I етап четвертого перетворення (нагрівання до 200 °С) супроводжується виділенням надлишкового вуглецю всередині мартенситу;

II етап четвертого перетворення (200 ... 300 °С) – розпад залишкового аустеніту. Продукт такого розпаду пересичений α -розчин і карбідна фаза – ϵ ;

III етап четвертого перетворення (300 °С) зняття напружень при остаточному переході тетрагонального мартенситу в рівноважний α -Fe і утворення Ц;

IV етап четвертого перетворення – остаточне відокремлення карбідних частинок і їх зростання при температурах > 400 °С.

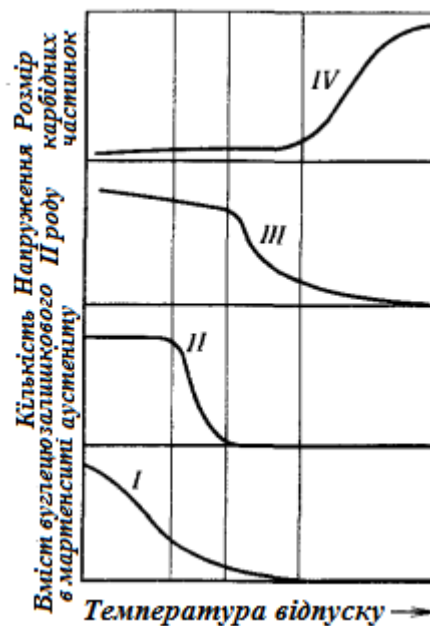


Рис. 15 – Основні етапи розпаду мартенситу у четвертому основному перетворенні