



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НІКОПОЛЬСЬКИЙ ТЕХНІКУМ
НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ АКАДЕМІЇ
УКРАЇНИ



МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

для самостійної роботи студентів з дисциплін:
"Основи металознавства", "Матеріалознавство і ТІМ"
"Матеріалознавство і конструкційні матеріали"

за розділом:

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

Нікополь

2002

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НІКОПОЛЬСЬКИЙ ТЕХНІКУМ
НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ МЕХАНІКИ

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

для самостійної роботи студентів з дисциплін:
“Основи металознавства”, “Матеріалознавство і ТІМ”
“Матеріалознавство і конструкційні матеріали”

за розділом:

ОСНОВИ ТЕОРІЇ
ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

Уклав

Г.О. КОЗЛОВ

Рецензент

В.Л. ЧУДНА

Рекомендовано
ПЦК металургійних дисциплін та
Протокол № 9 від 22 січня 2002 року
ПЦК інженерної механіки
Протокол № 7 від 14 лютого 2002 року

Затверджено
методичною радою технікуму
Протокол № 6
від “20” березня 2002 року

Нікополь, НТ НМетАУ
2002

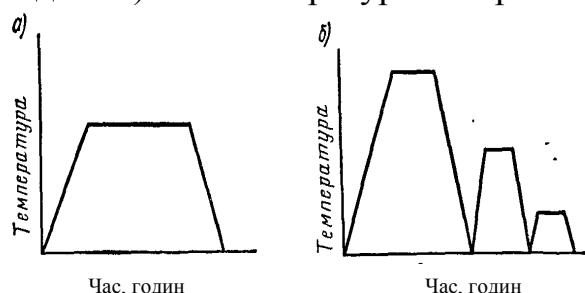
ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

§ 1. Загальні положення

Термічною обробкою називають процеси теплового впливу по визначених режимах з метою зміни структури і властивостей сплаву. Від термічної обробки залежить якість і стійкість у роботі деталей і інструмента.

Основоположником теорії і раціональних методів термічної обробки сталі є російський вчений Д. К. Чернов. Пріоритет у розробці багатьох методів термічної обробки сплавів належить вітчизняним вченим.

На результат термічної обробки впливають наступні фактори: час (швидкість) і температура нагрівання, час (тривалість) витримки і час (швидкість) охолодження.



а - проста; б - складна;
Рис. 1- Графіки термічної обробки

Таким чином, основними факторами термічної обробки є температура і час. Тому процес термічної обробки звичайно зображують у виді графіка в координатах температура — час (рис.1). Якщо термічна обробка складається тільки з однієї операції, то вона називається

простою (рис.1а), а якщо з декількох операцій - *складною* (рис.1б).

Теорія термічної обробки сталі базується на загальній теорії фазових перетворень, що протікають у сплавах у твердому стані. Знання теорії фазових структурних перетворень, що протікають при нагріванні й охолодженні сталі з різною швидкістю, дозволяє керувати процесами термічної обробки й одержувати сталь з необхідними структурою та властивостями.

§ 2. Перетворення перліту в аустеніт

Відповідно до лівої нижньої частини діаграми стану залізо - цементит (рис.2) при нагріванні доєвтектоїдної сталі (вихідна структура ферит + перліт) і переході через критичну точку A_{c1} (лінія PSK, температура $727^{\circ}C$) перліт

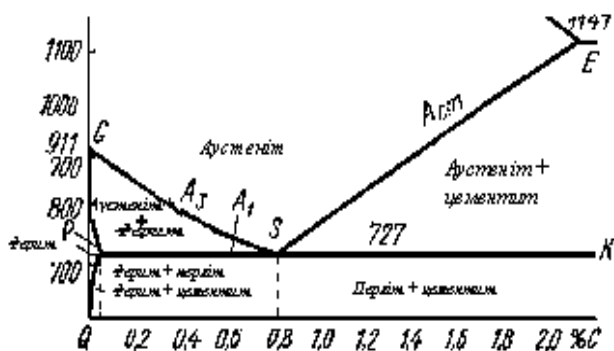


Рис.2 – Нижня ліва частина діаграми стану Fe-Fe₃C

перетворюється в аустеніт, тобто утвориться структура ферит + аустеніт. При подальшому підвищенні температури ферит поступово перетворюється в аустеніт і по досягненні температури, що відповідає критичній точці A_{c3} (лінія GS), структура сталі складається з одного аустеніту.

При нагріванні заєвтектоїдної сталі (вихідна структура перліт +

цементит) відбуваються аналогічні перетворення з тією лише різницею, що надлишковою фазою в даному випадку є не ферит, а цементит, що цілком розчиняється в аустеніті при досягненні температури критичної точки A_{cm} (лінія SE).

Для евтектоїдної сталі (вихідна структура перліт) перетворення (утворення аустеніту) закінчується при температурі критичної точки A_{c1} (лінія PSK , температура 727°C).

У дійсності перетворення перліту в аустеніт (а також і зворотне перетворення аустеніту в перліт) не може відбуватися при 727°C , тому що при цій температурі вільна енергія перліту дорівнює вільній енергії аустеніту. Тому для перетворення перліту в аустеніт температура нагрівання повинна бути вище рівноважної температури 727°C , тобто повинний бути так названий перенагрів так само, як для перетворення аустеніту в перліт повинне бути переохолодження.

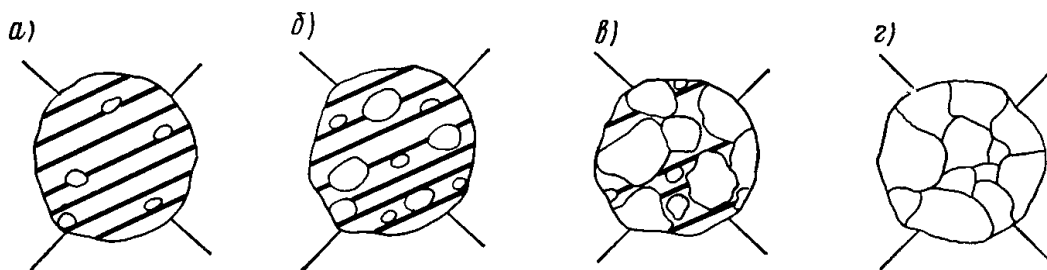


Рис. 3 - Схема утворення аустенітних зерен

Процес перетворення перліту в аустеніт у евтектоїдної сталі при нагріванні відбувається в такий спосіб. Вихідний стан сталі представляє суміш фаз фериту і цементиту. При переході через критичну точку A_{c1} на границі феритної і цементитної фаз починається утворення дрібних зерен аустеніту (рис.3а), у яких розчиняється цементит. Потім утворилися зерна ростуть, зароджуються нові дрібні зерна аустеніту (рис.3б,в) і продовжується розчинення цементиту. Процес закінчується заповненням обсягу колишнього перлітного зерна зернами аустеніту (рис.3г).

Таким чином, перетворення перліту в аустеніт є процесом кристалізаційного типу і носить дифузійний характер, тому що супроводжується переміщенням атомів вуглецю.

§ 3. Ріст зерна аустеніту при нагріванні

Зерна нової структури - аустеніту, що утворяться при нагріванні вище критичної точки A_{c1} із зерен перліту - виходять дрібними і називаються **початковими зернами аустеніту** (рис.4). При підвищенні температури відбувається ріст зерен і тим більше, чим вище температура нагрівання. Але схильність до росту зерен з підвищенням температури в сталей різна. Сталі, розкислені в процесі виплавки кремнієм (феросиліцієм) і марганцем

(феромарганцем), мають схильність до безперервного росту зерна з підвищенням температури. Такі сталі називають **спадково крупнозернистими** (рис.4). Сталі, що розкислені в процесі виплавки додатково алюмінієм, ванадієм чи титаном, не виявляють росту зерна при нагріванні до значно більш високих температур (900-950°C). Такі сталі називають **спадково дрібнозернистими** (рис.4).

Під спадковою зернистістю мається на увазі схильність аустенітного зерна до росту при підвищенні температури.

При нагріванні спадково дрібнозернистих сталей вище визначеної

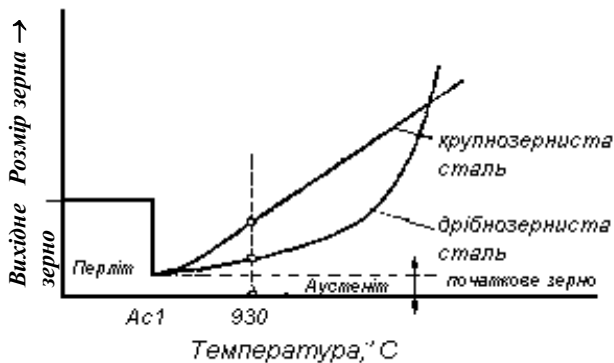


Рис.4 – Схема росту зерна аустеніту в спадково дрібно та крупнозернистій сталі

температури спостерігається різкий ріст зерна, і розмір зерна виходить навіть більшим, ніж у спадково крупнозернистих сталей, нагрітих до тієї ж температури. Таке поведінка спадково дрібнозернистих сталей при нагріванні пояснюється тим, що присутній у них алюміній утворює окисли Al_2O_3 і нітриди AlN , а ванадій і титан, крім окислів V_2O_5 , Ti_2 і нітридів VN , Ti , утворюють ще і

карбіди VC , Ti . Всі ці з'єднання у виді дрібних включень розташовуються по межах зерен і механічно перешкоджають їхнього росту при нагріванні. При визначеній температурі нагрівання відбувається розчинення включень в аустеніті, перешкоди, що гальмували ріст зерен, усуваються, і зерна починають рости дуже швидко.

Від величини зерна аустеніту, що утвориться при нагріванні, залежить величина зерна продуктів розпаду аустеніту. Якщо зерно аустеніту дрібне, то і продукти розпаду аустеніту виходять дрібними. Зерно сталі, що спостерігається при даній температурі в мікроскоп, називається **дійсним**. Від розміру дійсного зерна залежать механічні властивості сталі, головним чином

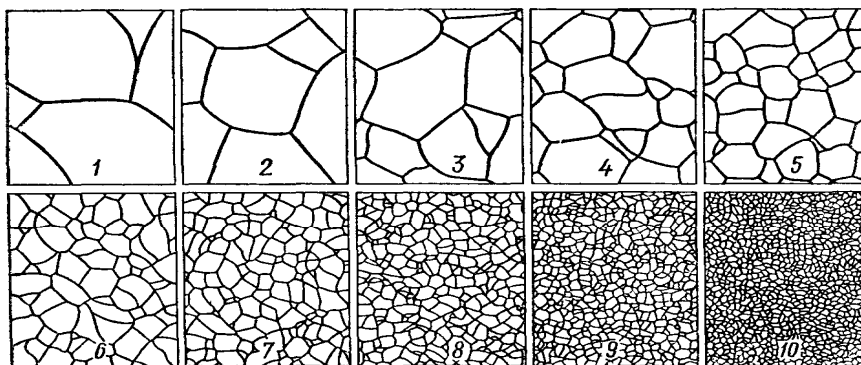


Рис. 5- Шкала для визначення величини зерна.

1-10 — номери зерен, X 100

в'язкість, що значно знижується зі збільшенням розміру зерна.

Розмір спадкового зерна впливає на технологічні властивості сталі. Якщо, наприклад, сталь спадково дрібнозерниста, отже, її можна нагрівати до високої

температури і витримувати тривалий час, не побоюючись росту зерна. Для визначення величини спадкового (аустенітного) зерна застосовують різні методи. Наприклад, для низьковуглецевих цементуючих сталей застосовують метод цементації, тобто науглецювання поверхні сталі. У результаті цементації (нагрів до $930 \pm 10^\circ\text{C}$ в вуглецевомістячій суміші і витримка при даній температурі протягом 8 годин поверхневий шар насичується вуглецем до заевтектоїдного складу. При охолодженні з аустеніту виділяється надлишковий цементит, що розташовується по межах зерен аустеніту у вигляді сітки. Після повного охолодження ця цементитна сітка оточує зерна перліту.

Таким чином, цементитна сітка, розташована навколо зерен перліту, показує розмір аустенітного зерна, який був при нагріванні. Підготовлена структура сталі розглядається в мікроскоп при збільшенні в 100 разів і видимі під мікроскопом зерна порівнюють з еталонними, передбаченими стандартною шкалою розмірів зерна за ДЕСТ 5639—95 (рис.5).

§ 4. Розпад аустеніту (діаграма ізотермічного перетворення аустеніту)

Розпад аустеніту може відбуватися тільки при температурах нижче 727°C (критична точка A_1), коли вільна енергія переохолодженого аустеніту вище вільної енергії продуктів його перетворення. З цього випливає, що для розпаду аустеніту повинне бути його переохолодження. Від ступеня переохолодження,

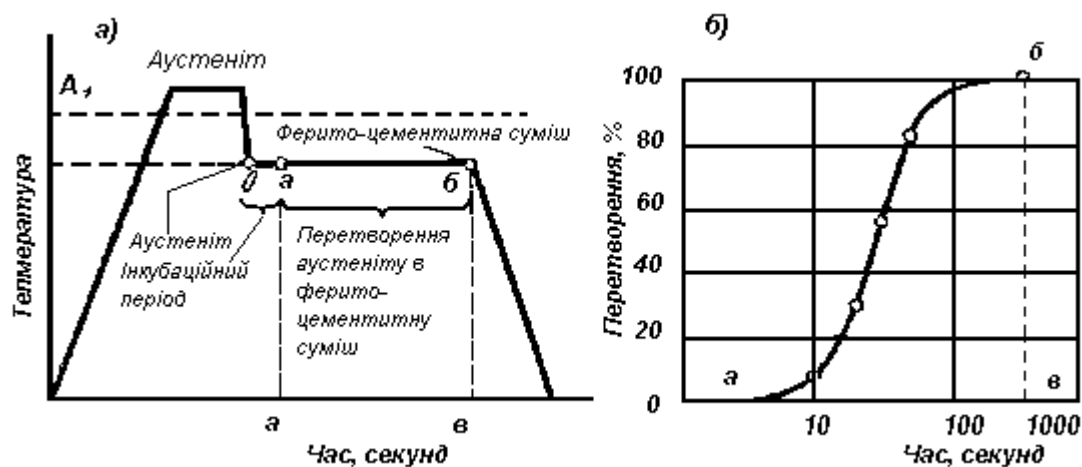


Рис. 6 – Графік (а) та крива (б) ізотермічного перетворення аустеніту

тобто від температури, при якій відбувається розпад аустеніту, залежить швидкість перетворення і будова продуктів розпаду аустеніту. Закономірність цього процесу характеризуються діаграмою ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту, тобто розпадом аустеніту (при постійній температурі).

Якщо нагріту до стану аустеніту сталь швидко остудити до температури нижче критичної точки A_1 і потім витримати при даній температурі, то перетворення аустеніту у ферито-цементитну суміш буде проходити протягом визначеного часу. Такий процес перетворення аустеніту при постійній температурі (ізотермічний процес) можна охарактеризувати кривими, приведеними на рис.6а. Після охолодження сталі до температури нижче

критичної точки A_1 аустеніт зберігається нераспавшимся якийсь час, рівний відріzkу $o-a$. Цей період часу називається *інкубаційним*. По закінченню інкубаційного періоду починається розпад аустеніту на ферито-цементитну суміш. З часом усе більше і більше розпадається аустеніт (відрізок $a-b$). Повний розпад аустеніту закінчується по закінченню часу, рівного відріzkу $a-b$ (рис.6б). Отже, для розпаду аустеніту на ферито-цементитну суміш при якійсь визначеній температурі потрібно конкретний час.

По експериментальних кривих, отриманих для багатьох температур переохолодження (t_1, t_2 , і т.д.), можна побудувати діаграму ізотермічного перетворення аустеніту. Для цього експериментальні криві суміщають на одній діаграмі (рис.7а). По осях координат діаграми ізотермічного перетворення аустеніту (рис.7б) відкладають час (вісь абсцис) і температуру розпаду аустеніту (вісь ординат). У зв'язку з тим що час розпаду аустеніту може змінюватися від декількох секунд до декількох годин, для зручності побудови застосовується логарифмічна шкала часу $\ln \tau$. Потім проводять лінії, що відповідають температурі A_1 (для евтектоїдної сталі) чи A_1 і A_3 (для доевтектоїдної сталі) і температурі початку мартенситного перетворення M_n . Точки a (початку розпаду аустеніту) і b (закінчення розпаду) для кожної температури перетворення переносять на відповідні горизонталі температур. Потім точки a_1, a_2 і т.д. з'єднують одну з одною, у результаті чого виходить ліва крива діаграми. Після переносу і з'єднання однієї з однією точок b_1, b_2 і т.д. виходить права крива діаграми.

Як видно (див.рис.7б), криві за формою подібні букві С тому їх і називають **С-кривими**. Ліва крива характеризує початок розпаду, а права - кінець розпаду аустеніту на ферито-цементитну суміш. Область між вертикальною віссю і кривою початку розпаду аустеніту - той період часу, протягом якого аустеніт не виявляє ознак розпаду, знаходиться в переохоложеному стані (інкубаційний період).

Як показано на діаграмі, при температурах трохи нижче критичної точки A_1 і при температурах трохи вище критичної точки початку мартенситного перетворення M_n аустеніт має найбільшу стійкість, так як при цих температурах ліва крива найбільш віддалена від вертикальної осі. При температурі t_3 аустеніт найменш стійкий, на що вказує ліва крива, найбільше

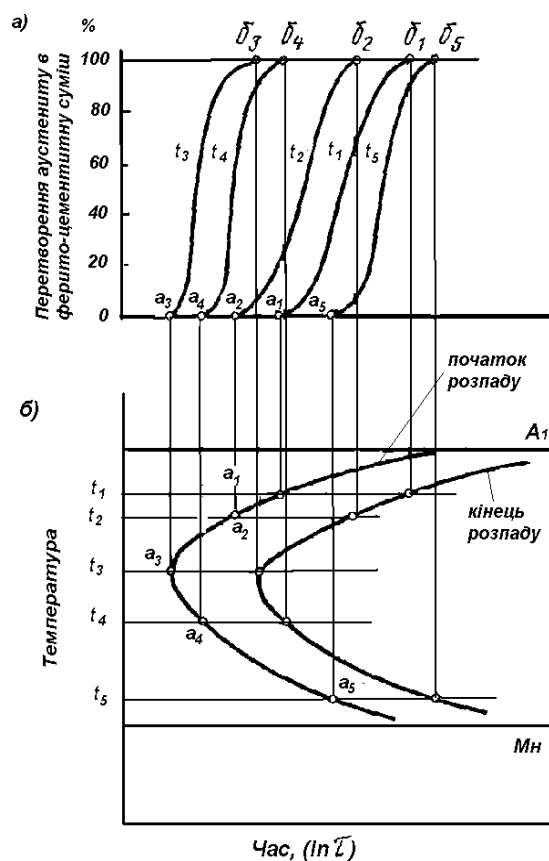


Рис. 7 – Схема побудови діаграми ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі

близько розташована до вертикальної осі. Отже, стійкість аустеніту залежить від розташування кривих ізотермічного розпаду аустеніту, чим правіше розташовані ці криві, тим більша стійкість аустеніту.

Приведена на рис.7б діаграма ізотермічного розпаду аустеніту характерна для евтектоїдної сталі. Якщо замінити умовно позначені температури конкретними даними, то така діаграма (ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі) буде мати вигляд, приведений на рис 8.

В залежності від ступеня переохолодження аустеніту розрізняють три температурні області перетворення: перлітну область, область проміжного перетворення і мартенситну область (рис.8).

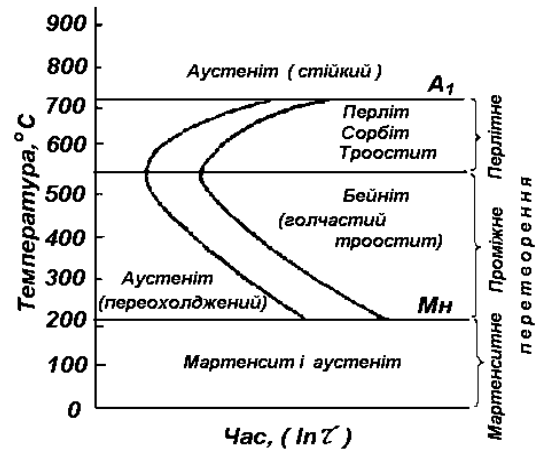


Рис.8 – Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі

§ 5. Перлітне перетворення

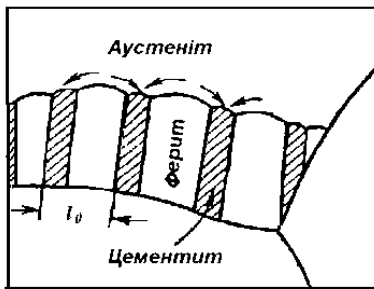


Рис.9 – Схема перетворення аустеніту в перліт

Перлітна область поширюється на інтервал температур від критичної точки A_1 до вигину S -кривої ($\sim 550^\circ\text{C}$). Перетворення аустеніту в перліт полягає в розпаді аустеніту на ферит і цементит.

Перед розпадом вуглець дифундує в середині аустеніту і накопичується у визначених місцях на межі зерна аустеніту з утворенням зародків цементиту.

Ріст зародків цементиту відбувається за рахунок дифузії вуглецю з прилягаючого аустеніту, що приводить до збіднення вуглецем аустеніту, який оточує утворені цементиту і сприяє перетворенню його у ферит. Тому поруч з цементитовими пластинами утворюються пластини фериту. Таким чином, виникає ділянка перліту, у якому пластини цементиту і фериту розташовані паралельно (рис 9 і 10а) При подальшому рості перлітного зерна ці пластини подовжуються (крайовий ріст) і приєднуються нові пари пластин, паралельні початковим (бічний ріст) (рис.10б). Такий процес відбувається до зіткнення перлітних зерен, їхнього зрощення і перетворення всього аустеніту в перліт (рис.10в).

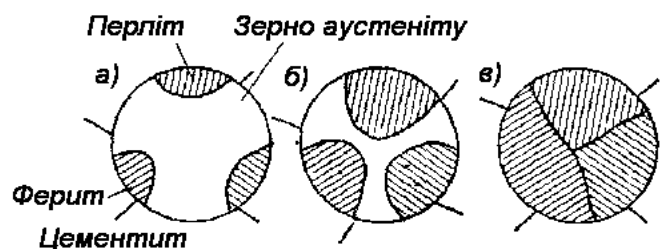


Рис.10 - Послідовні стадії утворення перлітних зерен в зерні аустеніту (схема)

Чим нижче температура, при якій відбувається розпад аустеніту, тим дисперсніша ферито-цементитна суміш, що утворюється. Ступінь

дисперсності прийнято характеризувати міжпластинчатою відстанню l_0 (рис.9), під якою мають на увазі усереднену суму товщин двох сусідніх пластинок фериту і цементиту. Перліт (рис.11а) отримується при розпаді аустеніту при малих ступенях переохолодження при температурі $\sim 700^\circ\text{C}$ ($l_0=0,6-1,0$ мкм; НВ180-250). Якщо аустеніт переохолоджений до $\sim 650^\circ\text{C}$ і при цій температурі розпадається, то більш дрібна, чим перліт, ферито-цементитна



Рис. 11 – Електронні мікрофотографії перліту (а), сорбіту (б) і трооститу (в), $\times 7500$

суміш, що утворюється, називається **сорбітом** (рис.11б). Твердість сорбіту НВ250-330, $l_0 = 0,25 - 0,3$ мкм. При переохолодженні аустеніту до $\sim 550^\circ\text{C}$ утворюється ще більш дрібна ферито-цементитна суміш, яка називається **трооститом** (рис.11в). Твердість трооститу НВ 330-400, $l_0 = 0,1 - 0,15$ мкм. Таким чином, структури перліт, сорбіт і троостит представляють собою ферито-цементитну суміш. Вони розрізняються між собою величиною часточок цементиту: в сорбіті ці часточки дрібніше, ніж у перліті, а в трооститі дрібніше, ніж у сорбіті.

При ізотермічному перетворенні аустеніту доєвтектоїдних сталей в інтервалі температур вище вигину С-кривої процес починається з виділення фериту (при температурі нижче A_3), що на діаграмі характеризується додатковою лінією $a-b$ (рис.12). При температурі нижче A_1 після виділення деякої кількості фериту аустеніт перетворюється у ферито-цементитну суміш. З підвищенням ступеня переохолодження (зниженням температури) зменшується виділення надлишкового фериту. Виділення фериту припиняється при температурі, що відповідає вигину С-кривої, і розпад аустеніту відбувається без виділення надлишкового фериту. При цьому утворюється ферито-цементитна суміш (троостит) з такою кількістю вуглецю, яку містить доєвтектоїдної сталі. Оскільки зі зниженням температури кількість надлишкового фериту, що виділяється, зменшується, то утворена при розпаді аустеніту ферито-цементитна суміш цих сталей, містить вуглецю менше ніж 0,8 %. Такий евтектоїд, що утворився з переохолодженого аустеніту і який має

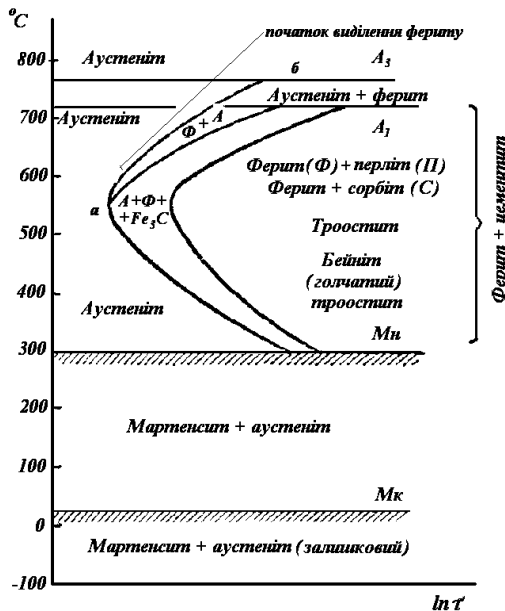


Рис.12 - Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту доєвтектоїдної сталі

концентрацію, відмінну від евтектоїдної (0,8%), називається *квазіевтектоїдом*.

При ізотермічному перетворенні заевтектоїдних сталей процес аналогічний. Різниця тільки в тім, що замість надлишкового фериту виділяється надлишковий цементит.

§ 6. Мартенситне перетворення

Мартенсит є основною структурою загартованої сталі. В більшості випадків прагнуть отримати цю структуру, тому що сталь, загартована на мартенсит, має високу твердість (HRC 50-65).

Мартенсит має зовсім відмінну від інших структур природу й утворюється не так, як ферито-цементитні структури.

При різкому переохолодженні вуглець не встигає виділитися з твердого розчину (аустеніту) у виді часточок цементиту, як це відбувається при утворенні перлиту, сорбіту і трооститу. Відбувається перебудова ґрат γ -заліза в ґрати α -заліза. Атоми вуглецю залишаються в ґратах α -заліза (мартенситі) і тому дуже їх спотворюють. Такі спотворені кристалічні ґрати називають *тетрагональними* (рис.13), у яких один параметр c більше іншого a і, отже, відношення параметрів $c/a > 1$. Ступінь спотвореності (тетрагональності) тим вище, чим більше вміст вуглецю в сталі. Отже, мартенсит є твердим розчином вуглецю в α -залізі, що здатне розчинити дуже невелику кількість вуглецю (до 0,02%), а в мартенситі вуглецю (розчин у α -залізі) стільки, скільки його міститься в аустеніті цієї сталі, тому мартенсит є α -твердим розчином, перенасиченим вуглецем.

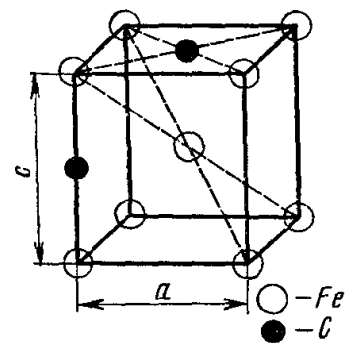


Рис.13 - Кристалічні ґрати мартенситу

Мартенсит розділяють на пластинчастий і рейковий.

Пластинчастий мартенсит (частіше його називають *голчастим*) спостерігається в загартованих середньо і високовуглецевих сталях.

Мартенситний кристал має форму тонкої пластини, але дуже рідко коли площина мартенситної пластини співпадає з площиною шліфа (рис.14а).

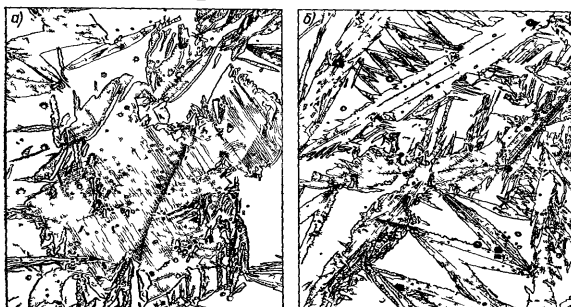


Рис. 14 – Мартенсит, х 1000

Звичайно в залежності від кута перетину пластин площиною шліфа вони спостерігаються під мікроскопом у вигляді голок різної товщини (рис.14б). Розмір пластин мартенситу залежить від розміру зерен аустеніту. Чим дрібніше зерна аустеніту, тим дрібніше виходять пластини мартенситу. При наявності дуже

дрібних пластин голчаста будова нерозрізна під мікроскопом при звичайно застосовуваних збільшеннях (500-600 разів) і мартенсит називають *безструктурним* або *прихованокристалічним* (рис.15). Така структура

характерна для правильно загартованої сталі.

Рейковий мартенсит (називається також **масивним**) спостерігається в загартованих низько і середньовуглецевих сталях. Кристали цього мартенситу мають вигляд рейок (планок), витягнутих в одному напрямку. Ці рейки з'єднані в пакети. В одному зерні аустеніту може бути кілька таких пакетів (рис.16).



Рис.15 – Безструктурний мартенсит, x 500

Характерним для мартенситного перетворення є те, що при температурі, що відповідає критичній точці M_n (рис.17), не відбувається повного перетворення аустеніту в мартенсит. При цій температурі починається утворення мартенситу — з'являються перші голки мартенситу. Тому температура точки M_n - це температура початку утворення мартенситу. Подальше, більш повне перетворення аустеніту в мартенсит, відбувається при зниженні температури і закінчується при визначеній температурі. Тому існує ще одна

критична точка - точка температури кінця перетворення аустеніту в мартенсит, що позначається M_k . Таким чином, весь процес утворення мартенситу з аустеніту протікає не при одній температурі, а в інтервалі температур.

Температура початку мартенситного перетворення (точка M_n) змінюється в залежності від вмісту вуглецю. Чим більше в сталі вуглецю, тим нижче (але постійна) температура, при якій починається перетворення аустеніту в мартенсит (рис.18). Температура точки M_k так само, як температура точки M_n , знижується з підвищенням в сталі вуглецю. При вмісті більш 0,6 % вуглецю мартенситне перетворення закінчується при температурах нижче нуля. Тому для того, щоб у високовуглецевих сталях отримати більшу кількість мартенситу, їх треба охолоджувати до температур нижче нуля.

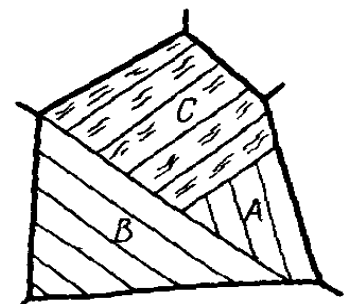


Рис.16 – Рейковий мартенсит. Схема будови одного з попередніх зерен аустеніту: А,Б,С – три пакети

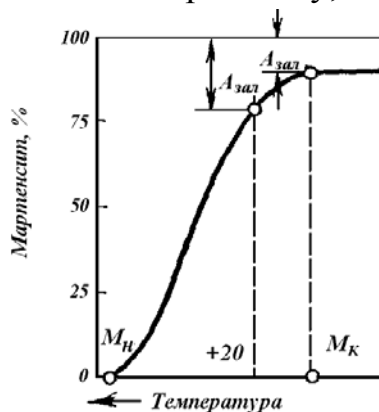


Рис. 17 - Крива мартенситного перетворення

Характерним для мартенситного перетворення є те, що навіть при температурі кінця мартенситного перетворення (точка M_k) не відбувається повного утворення мартенситу. Аустеніт частково залишається не перетвореним у мартенсит і називається **залишковим аустенітом** ($A_{зал}$, рис.17). Аустеніто-мартенситне перетворення супроводжується збільшенням об'єму. Всі структури сталі можна розташувати (від максимального об'єму до мінімального) у такий ряд: мартенсит - троостит - сорбіт - перліт - аустеніт.

§ 7. Проміжне (бейнітне) перетворення

При ізотермічній витримці в інтервалі температур від вигину S -кривої ($\sim 550^\circ\text{C}$) до точки M_n (див.рис.8) утворюється структура - **бейніт**. Бейнітне перетворення характерне поєднанням особливостей як дифузійного - перлітного так і бездифузійного - мартенситного перетворень, і тому воно називається також **проміжним перетворенням** (проміжним між перлітним і мартенситним).

Бейнітне перетворення починається з перерозподілу вуглецю в переохоложеному аустеніті з утворенням збіднених і збагачених вуглецем ділянок аустеніту. Ділянки збідненого аустеніту витримують мартенситне перетворення. Мартенсит, що утворився, нестійкий при цих температурах і в процесі ізотермічної витримки розпадається на ферито-цементитну суміш.

В ділянках аустеніту, збагачених вуглецем, виділяється цементит, при цьому утворюються ділянки аустеніту, збіднені вуглецем, в яких відбувається мартенситне перетворення, а потім розпад мартенситу на ферито-цементитну суміш. Крім бейніту, у структурі сталі після проміжного перетворення присутній залишковий аустеніт.

Ферит у бейніті, на відміну від фериту в перліті, є перенасиченим твердим розчином вуглецю в α -залозі, при ізотермічному перетворенні при температурі 400°C в ньому міститься $0,1\% \text{C}$, а при 300°C - $0,2\% \text{C}$.

В залежності від температури ізотермічної витримки мікроструктура і механічні властивості бейніту різні. Бейніт, що утворюється при температурі трохи нижче вигину S -кривої ($450-550^\circ\text{C}$) називається **верхнім бейнітом** і



а) верхній



б) нижній

Рис.19 - Бейніт, $\times 500$

має пір'ясту будову, що нагадує будову перліту (рис.19а). Твердість його приблизно така ж, як троостита.

Бейніт, що утворюється при більш низькій температурі (трохи вище точки M_n), називається **нижнім бейнітом** і має голчасту будову, схожу на будову мартенситу (рис.19б). Твердість його більш висока - $\text{HB}500-550$ (для евтектоїдної сталі).

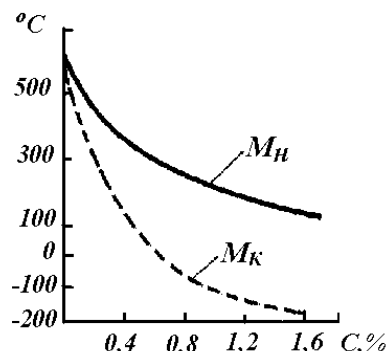


Рис. 18 - Вплив вуглецю на температуру початку M_n та кінця M_k мартенситного перетворення

§ 8. Перетворення аустеніту при безупинному охолодженні

Термічна обробка сталі звичайно проводиться не ізотермічним процесом (при постійній температурі), а безперервним охолодженням після нагрівання з отриманням аустеніту. Тому що криві охолодження будують в тих же координатах *температура - час*, що і діаграму ізотермічного перетворення

аустеніту, то для розгляду перетворення аустеніту при безперервному охолодженні нанесемо криві охолодження на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту (рис.20).

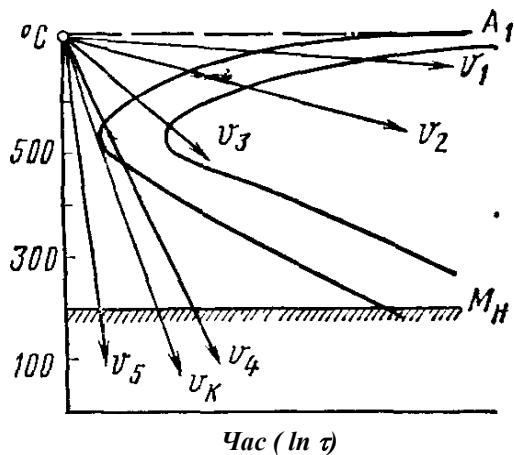
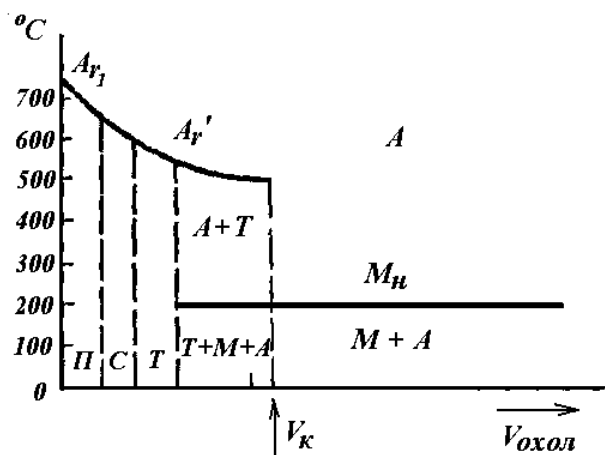


Рис.20 – Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту з кривими охолодження

При невеликій швидкості охолодження (крива v_1) утворюється перліт. Зі збільшенням швидкості охолодження (криві v_2 та v_3) утворюються більш дрібні ферито-цементитні суміші - сорбіт і троостит, тобто ті ж структури, що утворюються при ізотермічному процесі при збільшенні ступеня переохолодження. При ще більшій швидкості охолодження (крива v_4) не відбувається повного розпаду аустеніту на ферито-цементитну суміш, а частина його переохолоджується до точки M_n , у результаті чого утвориться структура, що складається з троостита і мартенситу. При

дуже великій швидкості охолодження (крива v_5) перетворення аустеніту у ферито-цементитну суміш не відбувається, весь аустеніт переохолоджується до температури точки M_n і перетворюється в мартенсит. Крива охолодження v_k (дотична до виступу ізотермічної кривої) характеризує мінімальну швидкість охолодження, при якій утворюється мартенсит без продуктів перлітного розпаду, і називається **критичною швидкістю загартування**.

На рис.21 приведена залежність критичних точок евтектоїдної сталі від швидкості охолодження. Зі збільшенням швидкості охолодження критична точка Ar_1 тобто температура, при якій відбувається перетворення аустеніту у ферито-цементитну суміш, знижується. Знижена критична точка Ar_1 позначається Ar' . Утворення троостито-мартенситної структури характеризується двома критичними точками - Ar' (утворення троостита) і M_n (початок утворення мартенситу). При швидкостях охолодження, більших за критичну швидкість загартування (v_k), при температурі критичної точки M_n починається перетворення аустеніту в мартенсит. Виявляється, якщо швидкість охолодження більше критичної, то мартенсит в цій сталі утворюється завжди при одній і тій же температурі (горизонтальна лінія на рис.21).



П - перліт, С - сорбіт, Т - троостит,
А - аустеніт, М - мартенсит

Рис.21 - Залежність критичних точок евтектоїдної сталі від швидкості охолодження

§ 9. Перетворення загартованої сталі при нагріванні

Загартована сталь, перебуваючи у напруженому і нестійкому стані, прагне до свого стійкого стабільного стану, тобто до перетворення мартенситу і залишкового аустеніту в ферито-цементитну суміш. Таке перетворення, характерне для нагрівання (відпуску) загартованої сталі, супроводжується зміною об'єму (довжини), тому що об'єм структур загартованої сталі різний - найбільший об'єм у мартенситу і найменший - в аустеніту. Тому якщо при нагріванні відбувається перетворення мартенситу, то об'єм (довжина) зменшується, а якщо розпадається аустеніт, то відбувається збільшення об'єму (довжини).

На рис.22 приведена крива впливу температури нагрівання на зміну довжини зразка загартованої сталі. При нагріванні (відпуску) загартованої сталі спостерігаються чотири перетворення: перше перетворення при нагріванні до температури 200° С, друге - в інтервалі 200-300° С, третє - при 300-400° С, четверте - при 400-600° С.

При першому перетворенні (нагрів до 200°С) спостерігається скорочення довжини, що зв'язано зі змінами, що відбуваються в тетрагональних ґратах мартенситу. Тетрагональність ґрат зменшуються і співвідношення осей c/a наближається до одиниці. Ступінь тетрагональності мартенситу залежить від вмісту вуглецю - чим більше вуглецю, тим більше тетрагональність ґрат. Якщо з пересиченого α - твердого розчину відбувається виділення вуглецю, то тетрагональність зменшується. Вуглець виділяється у виді найдрібніших пластинок низькотемпературного епсилон-карбіду

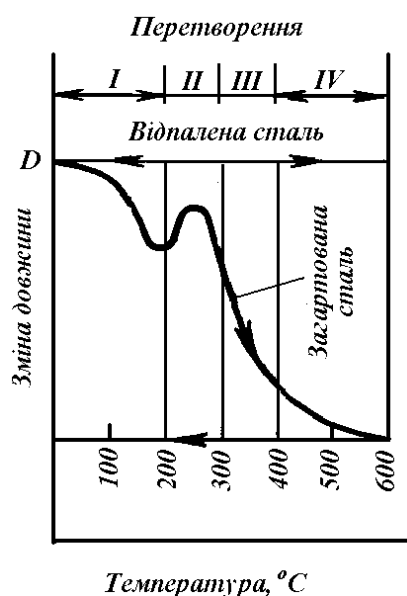


Рис.22 - Крива відпуску загартованої вуглецевої сталі

(ϵ - карбіду). Мартенсит, що утворився в результаті першого перетворення, називається **мартенситом відпуску** і є сумішшю перенасиченого твердого розчину вуглецю в α - залізі і ϵ - карбіду .

При низьких температурах нагрівання (до 80°С) не відбувається зміни об'єму і виділення вуглецю, тому що крива розташовується горизонтально (рис.22). Але це правильно тільки для нагрівання з невеликою тривалістю витримки. При дуже тривалій витримці перетворення відбуваються навіть при кімнатній температурі.

При другому перетворенні (нагрів при температурі 200-300°С) продовжується розпад мартенситу, у результаті якого вміст вуглецю в ньому знижується. Крім того, одночасно відбувається розпад залишкового аустеніту з перетворенням його в нижній бейніт. Таким чином, після другого перетворення у твердому розчині міститься невелика кількість вуглецю й у зв'язку з цим тетрагональність ґрат незначна. Переважне значення має розпад залишкового аустеніту (що перетворюється в нижній бейніт), тому при другому перетворенні відбувається розширення сталі (рис.22).

Третє перетворення (нагрів при температурі 300-400°C) характеризується знову скороченням довжини (рис.22) і повним розпадом α - твердого розчину (мартенситу). При цьому відбувається перетворення цементиту з пластинчастого в дрібнозернистий. У результаті третього перетворення утвориться найбільш дрібна ферито-цементитна суміш, тобто **троостит відпуску**.

При четвертому перетворенні (нагрів при температурі 400-600°C) відбувається укрупнення (коагуляція) зернистих часточок цементиту з утворенням структури **сорбіту відпуску**. Укрупнення відбувається шляхом розчинення дрібних часточок цементиту, наступної дифузії вуглецю і виділення його на поверхні більш крупних часток цементиту. При цьому не відбувається ніяких перетворень, пов'язаних зі зміною складу і кристалічної структури фериту і цементиту.

Зміна структури при нагріванні (відпуску) викликає зміну і механічних властивостей загартованої сталі. З підвищенням температури відпуску твердість і міцність знижуються, а пластичність і в'язкість підвищуються (рис.23).

У результаті відпуску (розпаду мартенситу) утворюються структури троостита і сорбіту. Такі ж структури отримується і в результаті ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту. Між трооститом і сорбітом, отриманими в результаті розпаду мартенситу, і трооститом і сорбітом, отриманими в результаті ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту є різниця в їхній внутрішній будові й у механічних властивостях. Цементит у трооститі і сорбіті, отриманих у результаті ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту, утворюється у вигляді пластин (пластинчаста будова), а при розпаді

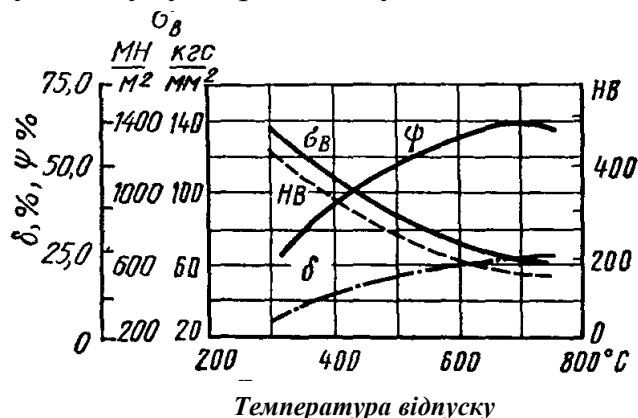


Рис.23 – Зміна механічних властивостей загартованої сталі 40 в залежності від температури відпуску

мартенситу - у вигляді зерен (зерниста будова). На твердість і міцність форма цементиту помітно не впливає, але пластичність і в'язкість сталі з зернистою будовою більш високі, ніж пластичність і в'язкість сталі з пластинчастою будовою. Міцність ферито-цементитних сумішей (перліту, сорбіту, троостита) пояснюється наявністю включень цементиту, що перешкоджають переміщенню дислокацій при дії зовнішніх сил.

Чим більше включень цементиту і чим вони менше за розміром, тим більше вони перешкоджають переміщенню дислокацій. Тому троостит, у якому часточки цементиту найбільш дрібні, має більшу твердість (міцність) у порівнянні із сорбітом, а перліт, що містить найбільш крупні включення цементиту, має найменшу міцність (твердість).

ЗМІСТ

§ 1. Загальні положення	3
§ 2. Перетворення перліту в аустеніт	3
§ 3. Ріст зерна аустеніту при нагріванні	4
§ 4. Розпад аустеніту	6
§ 5. Перлітне перетворення	8
§ 6. Мартенситне перетворення	10
§ 7. Проміжне (бейнітне) перетворення	12
§ 8. Перетворення аустеніту при безупинному охолодженні.....	12
§ 9. Перетворення загартованої сталі при нагріванні	14