

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №7

«Аналіз і освоєння способів прогнозування та управління
структурно-фазовим станом вуглецевих сталей»

з дисципліни «Зносостійкі, фрикційні та антифрикційні матеріали»
для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення
зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання

2018

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 7
«Аналіз і освоєння способів прогнозування та управління структурно-
фазовим станом вуглецевих сталей» з дисципліни «Зносостійкі,
фрикційні та антифрикційні матеріали» для студентів освітньої
програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і
конструкцій» усіх форм навчання /Укл.: М.І. Андрущенко, О.Є.
Капустян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. - 30 с.

Укладачі: М.І. Андрущенко, канд. техн. наук, доцент

О.Є. Капустян, старш. викл.;

Рецензент: М.Ю. Осіпов, канд. техн. наук, доцент

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено

на засіданні кафедри ОТЗВ

Протокол № 6 від 22.01.2018

Рекомендовано до видання

НМК ІФФ

Протокол № 6 від 15.02.2018

1 МЕТА РОБОТИ

Освоїти способи прогнозування та управління структурно фазовим станом вуглецевих сталей.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Відомо, що одним з найбільш значущих чинників, що визначають опірність матеріалів зношуванню та інших властивостей (міцність, пластичність та ін.) є їх структура. До теперішнього часу накопичено багато даних про вплив структурно-фазового стану сталей і сплавів на їх властивості. Залежно від умов експлуатації деталей оптимальною структурою може бути один з багатьох варіантів фазових комбінацій – від феритного стану до заєвтектичних структур з великою кількістю зміцнюючих фаз різних типів. Залежно від хімічного складу сталі діляться на вуглецеві і спеціальні.

За призначенням вуглецеві сталі підрозділяються на:

- 1) конструкційні;
- 2) інструментальні.

Конструкційні матеріали це сталі, які призначені для виготовлення різного виду споруд, конструкцій і деталей машин. Основні вимоги, що пред'являються до цих сталей це хороша пластичність в поєднанні з достатньою міцністю. За вмістом вуглецю і структурою - це доєвтектоїдні сталі (вуглецю до 0,8%). Конструкційні сталі за вмістом вуглецю можна поділити на три групи:

1. Низьковуглецеві (будівельні сталі) містять вуглецю до 0,3%. Ці сталі мають σ_v до 400 МПа, δ до 40%, НВ до 1300 МПа і застосовуються, головним чином, у вигляді листового, профільного і сортового прокату в якості будівельного матеріалу для виготовлення конструкцій і споруд методом зварювання. Всі вони мають високу пластичність. Після певних видів хіміко-термічної обробки вони можуть використовуватися в якості зносостійких, або корозійностійких.

2. Середньовуглецеві містять вуглецю 0,3 - 0,6%. Ці сталі мають від 400 до 800 МПа, δ від 20 до 25% і НВ - від 1400 до 2000 МПа.

Застосовуються у вигляді сортового і листового прокату, штамповок і поковок як машинобудівні сталі для виготовлення деталей машин. Як правило, вони піддаються термічній обробці для підвищення міцності та зносостійкості.

3. Високовуглецеві - вміст вуглецю 0,6 - 0,8%. Можуть застосовуватися для виготовлення ресор і пружин, і деяких видів зносостійкого інструменту, наприклад, напилків. Після термічної обробки мають високу твердість, міцність і межу пружності.

У металургії сталь отримують (виплавляють) різними методами (мартенівський, конвертерний, електрошлаковий переплав, вакуумно-індукційний переплав і т.д.). Природно, що в залежності від прийнятого способу виготовлення сталі будуть відрізнятися як за хімічним складом, так за якістю. Відповідно до діючих стандартів, розрізняють конструкційні сталі звичайної якості, якісні і високоякісні.

Прогнозування структури сталей і призначення режимів термообробки можна спираючись на діаграму рівноваги залізо - вуглець (рис. 2.1), ізотермічні і термокінетичні діаграми.

Наведемо загальноприйняті позначення критичних точок. Вони позначаються літерою «А». Нижня критична точка, що позначається A_1 , лежить на лінії PSK і відповідає перетворенню аустеніту в перліт. Верхня критична точка A_3 лежить на лінії GSE і відповідає початку випадання, або кінця розчинення фериту в доєвтектоїдних сталях або цементиту (вторинного) в заєвтектоїдних. Щоб відрізнити критичну точку при нагріванні від критичної точки при охолодженні поруч з буквою А ставлять індекс:

При нагріванні - «с» (A_c); при охолодженні = «г» (A_r).

A_{c1} - перетворення перліту в аустеніт $[Fe_\alpha + FeC] \rightarrow Fe_\gamma$;

A_{r1} - перетворення аустеніту в перліт $Fe_\gamma \rightarrow [Fe_\alpha + Fe_3C]$;

A_{c2} - перетворення магнітного фериту в немагнітний $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\beta$;

A_{r2} - перетворення немагнітного фериту в магнітний ($Fe_\beta \rightarrow Fe_\alpha$)

A_{c3} - перехід останніх кристалів Fe_α у Fe_γ ;

A_{r3} - поява перших кристалів Fe_α з Fe_γ ;

A_{cm} - перехід Fe_3C (II) $\leftrightarrow Fe_\gamma$.

Розглядаючи структурні перетворення в сталі, необхідно згадати, що основними є дві фази, і одна структурна складова, а перехід їх з однієї в іншу характеризує основні перетворення при нагріванні та охолодженні сталі. Цими фазами і структурою є:

- ферит - твердий розчин вуглецю в α -залізі (Fe_α);
- аустеніт твердий розчин вуглецю в γ - залізі (Fe_γ);
- мартенсит – пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі (Fe_α);
- перліт - евтектоїдна суміш фериту і карбиду цементитного типу [$\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$].

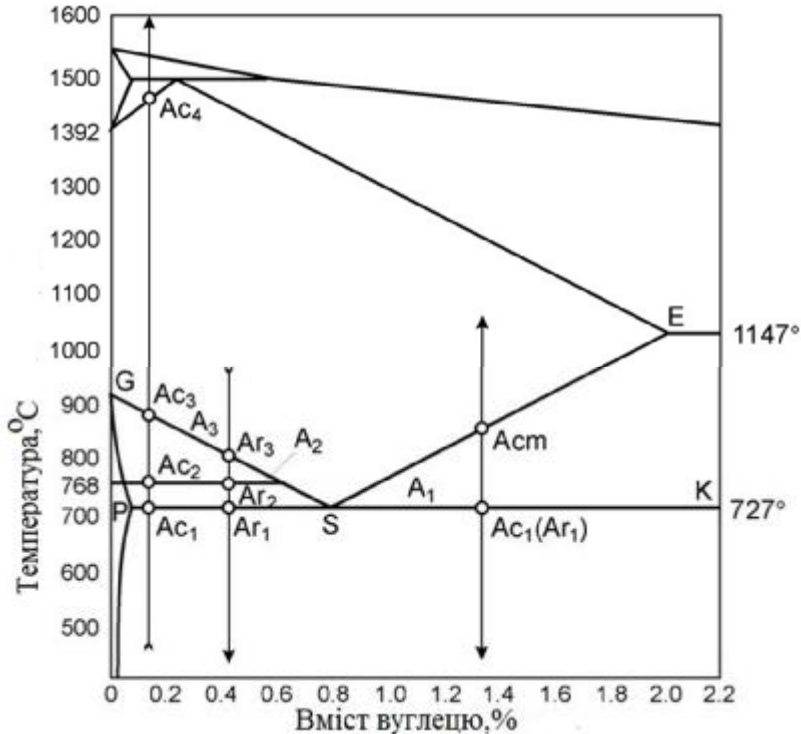


Рисунок 2.1 - «Стальна» частина діаграми рівноважного стану залізо-вуглець

При термообробці сталі спостерігається чотири основних перетворення, які зі зміною вільної енергії аустеніту (F_A), мартенситу (F_M) і перліту (F_P) в залежності від температури нагрівання (рис 2.2).

I. Перетворення перліту в аустеніт, що протікає вище точки

A₁:

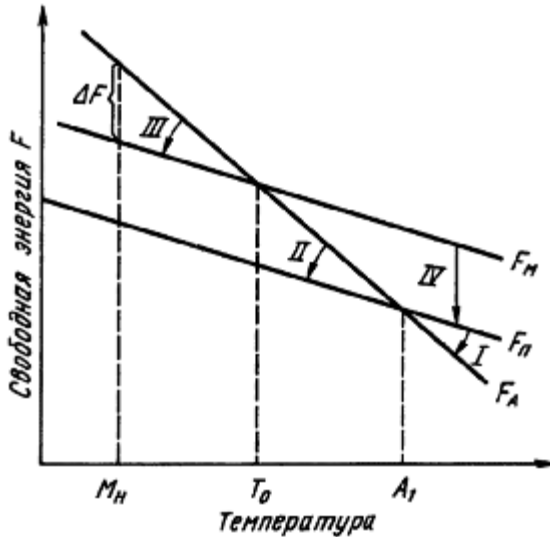


Рисунок 2.2 Схема зміни вільної енергії аустеніту (F_A), мартенситу (F_M) і перліту (F_P) в залежності від температури нагрівання.

При температурах вище температури стабільної рівноваги аустеніт-перліт з трьох основних структур мінімальну вільну енергію має аустеніт.

II. Перетворення аустеніту в перліт, що протікає нижче точки A_1 :

III. Перетворення аустеніту в мартенсит:

Протікає нижче температури T_0 . При температурі T_0 більш стійкою фазою є перліт, але робота для утворення мартенситу потрібна менша, тому спочатку аустеніт перетворюється в мартенсит, а вже потім в перліт. Таким чином аустеніто-мартенситні перетворення в даному випадку є проміжними в процесі переходу аустеніту в перліт.

IV. Перетворення мартенситу в перліт

Воно відбувається при всіх температурах так як при будь-яких $t_{\text{ФМ}} > t_{\text{П}}$.

Розглянемо ці процеси більш детально.

Перетворення перліту в аустеніт в повній відповідності з діаграмою стану Fe-Fe₃C може відбуватися лише при повільному нагріванні.

В умовах звичайного нагріву при T_0 перетворення $P \rightarrow A$ запізнюється, виходить перенагрівання. Перенагрітий вище критичної точки перліт з різною швидкістю, в залежності від ступеня перенагрівання перетворюється в аустеніт. Час перетворення перліту в аустеніт при різних температурах різний (рис.2.3). Промінь V_2 показує нагрів сталі з якоюсь певною швидкістю. Він перетинає лінії початку і кінця перетворення в точках a' і b' . Отже при безперервному нагріванні зі швидкістю V_2 можна зафіксувати перетворення, що протікає в інтервалі температур від точки a' до точки b' . Якщо нагрів був повільним, то промінь V_1 перетинає криві перетворення при більш низьких температурах (точки, a'' і b''), перетворення відбудеться теж при більш низьких температурах. Криві початку і кінця перетворення, асимптотично наближаючись до горизонталі A_1 і перетинають її в практично безкінечності, де зливаються. Перетворення перліту в аустеніт відбудеться в одній точці при постійній температурі. Це, очевидно, і буде випадок рівноважного перетворення по діаграмі Fe-Fe₃C.

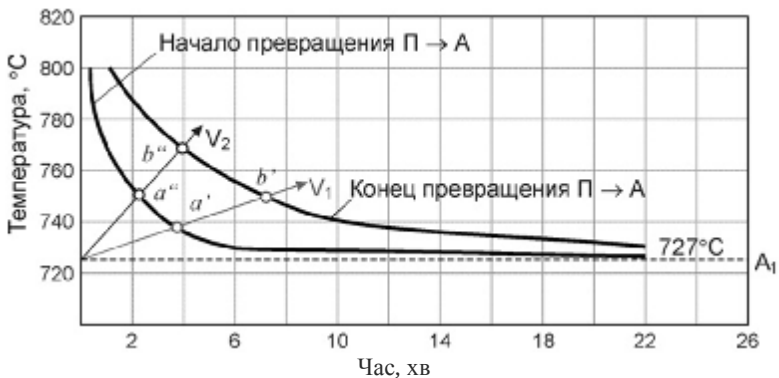


Рисунок 2.3

В теорії термічної обробки Блантер М.Є. описує процеси, що відбуваються при нагріванні сталі. Детально розглянуто утворення

аустеніту в рівноважних умовах в сталях з вихідною структурою перліту. Згідно діаграми рівноважного стану залізо - вуглець утворення аустеніту евтектоїдній вуглецевої сталі відбувається негайно після нагрівання трохи вище температури A_1 . Проте це перетворення реалізується в зазначених умовах тільки при дуже повільному нагріванні. Насправді швидкість утворення аустеніту визначається температурою перетворення. Зі збільшенням температури перегріву відбувається значне підвищення швидкості перетворення перліту в аустеніт. На рис. 2.4 приведена залежність утворення аустеніту від температури процесу. При температурі 730°C , що лежить поблизу A_1 перетворення перліту в аустеніт починається через 65 с, а закінчується через 90 хв.

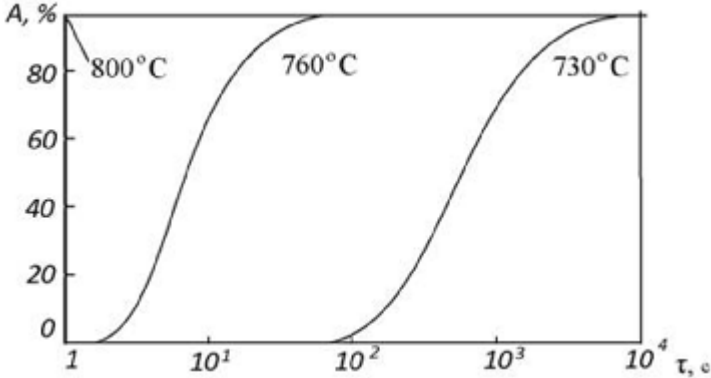


Рисунок 2.4 - Вплив температури на кінетику утворення аустеніту в евтектоїдній вуглецевій сталі [1]

При 760°C початок спостерігається через 2 с, а кінець через 30 с; при 800°C перетворення закінчується через 1 с. На цей процес впливають два фактори. По-перше - це збільшення різниці вільної енергії при перетворенні перліту в аустеніт. По-друге - з підвищенням температури збільшується швидкість дифузійних процесів [1]. Крім того швидкість описаних реакцій також залежить від дисперсності цементиту і від його форми. Чим дрібніше частинки цементиту і отже більше їх сумарна поверхня, тим швидше відбувається перетворення.

При виборі температури гартування слід пам'ятати про можливе зростання зерен аустеніту. Початок перлітно-аустенітного перетворення супроводжується утворенням перших зерен аустеніту. Вони утворюються на границі між феритом і цементитом. Границі

дуже розгалужені. В одному см^3 перліту площа границь між феритом і цементитом сягає кілька м^2 . Тому перетворення починається з утворення безлічі дрібних зерен. Розмір цих зерен характеризує величину початкового зерна аустеніту. Подальший нагрів викликає зростання зерен аустеніту. Тому зменшується сумарна поверхня зерен, тобто зменшується поверхнева енергія. Висока температура лише забезпечує достатню швидкість перетворень. В цьому зв'язку розрізняють два типи сталей:

- спадково дрібнозернисту;
- спадково крупнозернисту.

Перша характеризується малою схильністю до зростання зерна, друга - підвищеною схильністю. Перехід температури через A_1 супроводжується різким зменшенням зерна. Далі при нагріванні зерно аустеніту у дрібнозернистій сталі не росте до $950 \div 1000^\circ \text{C}$, після чого усуваються чинники, що перешкоджають росту, і зерно починає швидко рости. У спадково крупнозернистій сталі ніщо не перешкоджає зростанню зерна, яке і починається незабаром після переходу через критичну точку A_1 .

Величину зерна можна оцінювати за шкалою (рис. 2.5) за допомогою оптичного мікроскопа при збільшенні в 100 разів.

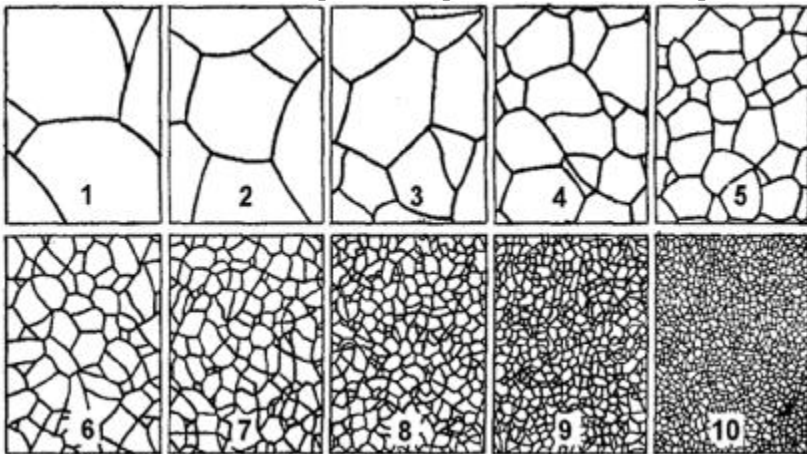


Рисунок 2.5 – Шкала для оцінки величини зерна з допомогою оптичного мікроскопу при збільшенні в 100 разів

Після охолодження сплаву в результаті термічної обробки продукти розпаду аустеніту, наприклад перліту, мають тим більше

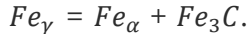
зерно, чим більше було початкове зерно аустеніту. Нагрівання сталі до високих температур і тривалі витримки при цих температурах можуть привести до появи дефектів, які називають перегрівом і перепалом.

Виходячи з вище наведеного, для вуглецевої сталі при пічному нагріванні рекомендується призначати температуру на 20 - 30°C вище температури A_1 . Для легованої сталі внаслідок протікання дифузії не тільки вуглецю, але і легуючих елементів, температура нагріву повинна бути вище на 50 - 60°C.

II. Перетворення аустеніту в перліт

Всі сталі після повної аустенітизації, яка досягається нагріванням до ектеткоїдних сталей вище A_{c3} , евтектоїдних вище A_{c1} і заевтектоїдних вище A_{cm} мають структуру аустеніту. Ця фаза (А) в вуглецевих сталях стійка при температурі 727° С. Вона може зберігатися протягом деякого часу і при більш низьких температурах, але в цих умовах аустеніт нестійкий і прагне перетворитися в інші структури.

Перетворення аустеніту в перліт полягає в розпаді, твердого розчину вуглецю в γ -залізі, на α -залізо і цементит:



При температурі рівній A_1 перетворення аустеніту в перліт неможливе. Воно може початися при деякому переохолодженні, коли $F_A > F_{\Pi}$.

Під ступенем переохолодження аустеніту розуміють різницю між рівноважною температурою A_1 і температурою, при якій в дійсності відбувається перетворення.

Чим нижче температура перетворення і більше переохолодження, тим більше ΔF і тим швидше відбувається перетворення. У разі перлітного перетворення утворюються фази різко відмінні за складом від вихідної. Ферит Fe_{α} , який майже не містить вуглецю і цементит Fe_3C , в якому 6,67% С.

Перетворення $A \rightarrow \Pi$ супроводжується дифузією, перерозподілом вуглецю. Швидкість дифузії зменшується зі зниженням температури. Процес утворення перліту - це процес зародження центрів перліту і зростання його зерен. Отже, швидкість перетворення залежить від швидкості росту і числа центрів

кристалізації. У точці A_1 обидва параметри дорівнюють нулю. Вони і мають максимальне значення при переохолодженні $150 \div 200^\circ \text{C}$, тобто якщо виконані всі умови (аустеніт переохолоджений нижче A_1 , $F_A > F_n$ і $D \neq 0$), то процес почнеться і буде відбуватися протягом деякого часу.

При охолодженні сталей нижче рівноважної температури A_{c1} аустеніт знаходиться в метастабільному стані і зазнає перетворення, які залежать від швидкості охолодження. При повільному охолодженні, як це впливає з діаграми "залізо - цементит" (див. рис. 2.1), аустеніт перетворюється в перліт. Це перетворення є типовим, що підкоряється загальним закономірностям кристалізації:

1) рушійна сила перетворення полягає в зменшенні вільної енергії сплаву в результаті перетворення аустеніту в перліт або будь-які інші структури і фази (див. рис. 2.2);

2) для перетворення аустеніту в реальних умовах необхідний певний ступінь переохолодження (ΔT); отже, аустеніт деякий час може існувати в переохолодженому, нестійкому стані;

3) перетворення аустеніту в перліт, як і всі структурні перетворення, полягає в утворенні і зростанні центрів кристалізації нової фази. Швидкість розпаду аустеніту визначається, таким чином, числом центрів кристалізації і швидкістю росту кристалів з цих центрів. Величина параметрів кристалізації і залежить від ступеня переохолодження, що досягається зміною швидкості охолодження.

4) чим вище швидкість охолодження і, також, ступінь переохолодження, тим дрібніше зерна продуктів розпаду аустеніту; в результаті підвищуються твердість, межі міцності і текучості сталі.

Для аналізу перетворень, що відбуваються в сталях при охолодженні, користуються діаграмою ізотермічного розпаду аустеніту (рис 2.6), яка є основою при виборі способу охолодження з метою отримання заданих властивостей. На цій діаграмі по вертикальній осі відкладають температури, а по горизонтальній - час. Пунктирна пряма, проведена при температурі 727°C , служить границею стійкого аустеніту.

Властивості і будова продуктів перетворення аустеніту залежать від температури, при якій відбувався процес його розпаду і швидкості охолодження. При високих температурах, тобто при малих ступенях переохолодження, виходить досить груба суміш фериту і цементиту - перліт (рис. 2.7). При більш низьких температурах, і, отже при

великих ступенях переохолодження дисперсність структур зростає і твердість продуктів підвищується. Дрібнопластинчатий перліт, що утворюється при температурах $650 \div 600^\circ \text{C}$, називається сорбітом (рис. 2.8 б).

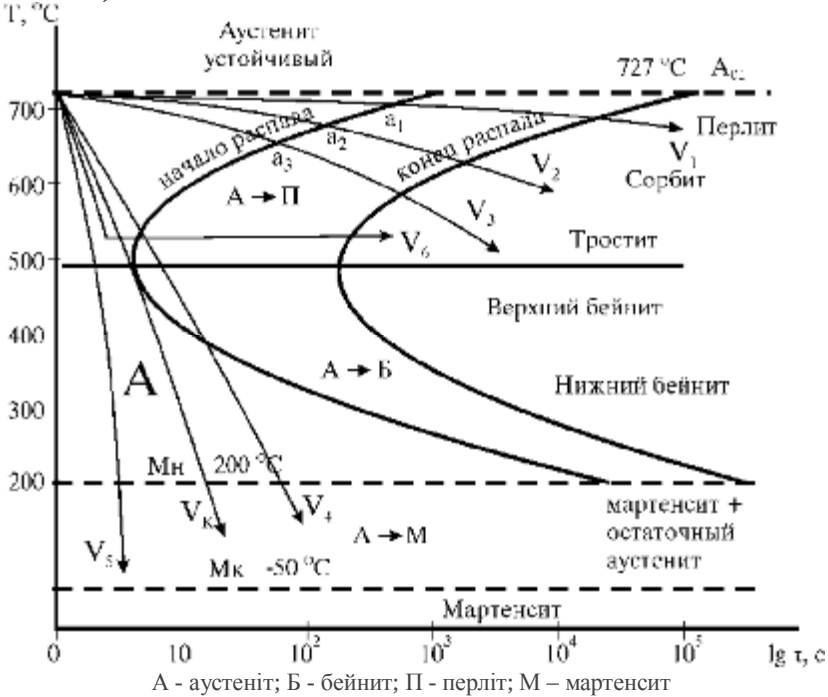


Рисунок 2.6 - Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту

В районі виступу кривих початку і кінця розпаду («носа діаграми») утворюється дуже дрібнозернистий перліт, який називається троститом (рис. 2.8 в).

Тобто при розпаді аустеніту утворюються перлітні структури з однаковою природою (ферит + цементит), які відрізняються ступенем дисперсності фериту і цементиту.

Перлітні структури можуть бути двох типів: пластинчасті, коли цементит знаходиться в формі пластинок (рис. 2.9 а), або зернисті (цементит знаходиться в формі зерняток) (рис 2.9 б).

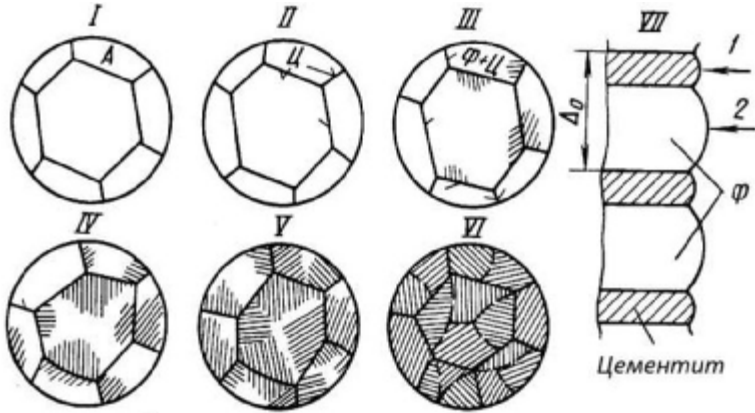
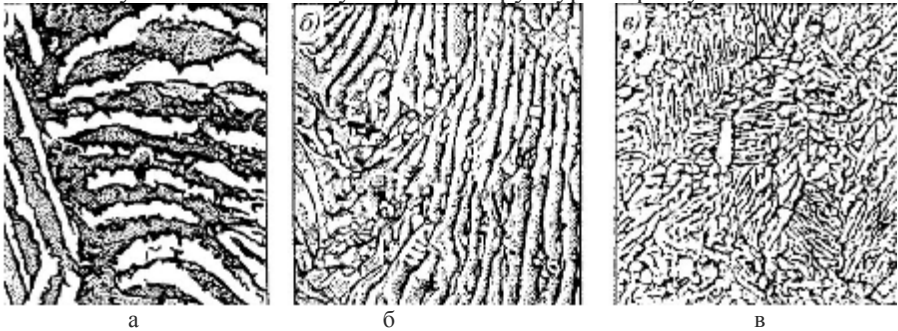


Рисунок 2.7 – Схема утворення структури перліту



а – перліт, б - сорбіт, в - троостіт

Рисунок 2.8 - Структура продуктів перетворення аустеніту

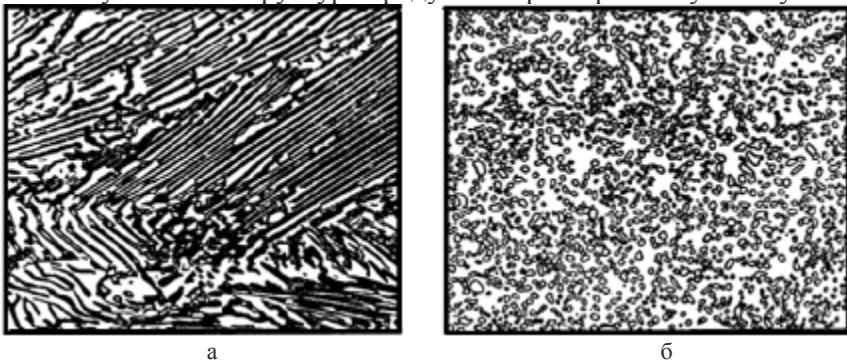


Рисунок 2.9 - Мікроструктура перліту пластинчатого (а) і зернистого (б).

Однорідний (гомогенний) аустеніт завжди перетворюється в пластинчастий перліт. Отже, нагрівання до високої температури, яке створює умови для формування більш однорідної структури, сприяє появі пластинчастих структур. Неоднорідний аустеніт при всіх ступенях переохолодження дає зернистий перліт, отже, нагрівання до невисокої температури (для заевтектоїдної сталі нижче A_{c3} веде до утворення при охолодженні зернистого перліту.

Таким чином, розмір цементитних частинок залежить від температури перетворення аустеніту, а форма цементиту - від температури нагріву.

В залежності від вмісту вуглецю сталі розділяють на доевтектоїдні, евтектоїдні і заевтектоїдні (рис. 2.10).

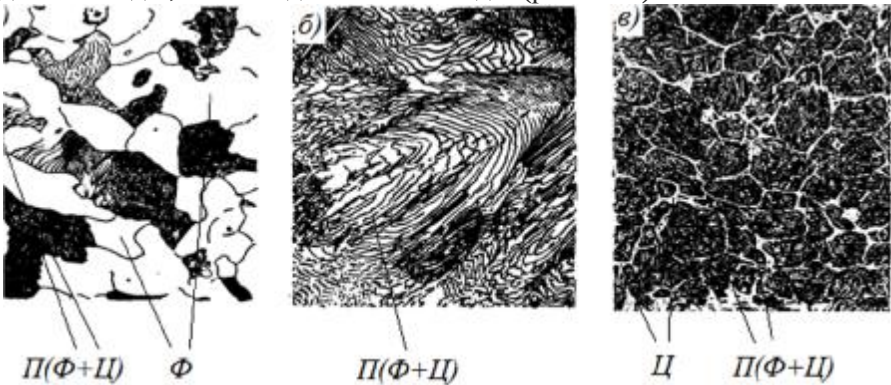


Рисунок 2.10 - Мікроструктура доевтектоїдної (а), евтектоїдної б) і заевтектоїдної сталі (в).

При швидкостях гартування менше, ніж це потрібно для утворення мартенситу (нижче виступу кривих початку і кінця розпаду аустеніту), перетворення відбувається, в основному, в особливу структуру, яка називається бейніт. Бейніт схожий на перліт в тому, що він складається з фериту і карбідів. Але карбідна складова бейніту більш дрібнодисперсна, має вигляд упорядкованих ниток або ланцюжків, тобто, як і мартенсит носить голчастий характер (рис. 2.11). Світлі і темні голки виникають в результаті неоднакового травлення зерен з різними орієнтаціями.

Бейніт зустрічається в двох формах - верхній і нижній - в залежності від температури, при якій він утворився. Верхній бейніт утворюється в температурному інтервалі $550...350^{\circ}\text{C}$. Його структура

складається з рейок бейнітного фериту (Φ'), між якими розташовуються подовжені частинки карбіду (К), (рис. 2.12а).



Рисунок 2.11 - Бейнітна структура сталі 60С2А (термообробка: 845° С протягом 10 хв, 310° С протягом 4200 с, охолодження в воді. Твердість 576 НV).

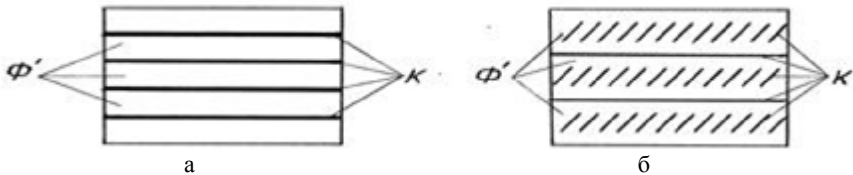


Рисунок 2.12 - Схеми будови верхнього (а) і нижнього (б) бейніту

При температурах від 350° С до M_K утворюється нижній бейніт. При цих температурах швидкість дифузії вуглецю значно уповільнюється, а рост кристалів фериту зростає. Внаслідок цього частинки карбіду, що виділяються з пересиченого твердого розчину, захоплюються феритом. Тому, на відміну від верхнього, у нижньому бейніті карбідні частинки розташовані в середині кристалів фериту під кутом близько 60° до їх поздовжньої осі (рис. 2.12 б). У нижньому бейніті карбіди більш дисперсні. Міцність бейніту наближається до міцності мартенситу, а в'язкість часто вище, ніж у відпущеного мартенситу при тій же самій твердості. Перетворення аустеніту в бейніт супроводжується збільшенням об'єму, що призводить до внутрішніх напружень.

У зв'язку з різною будовою продукти розпаду аустеніту мають різні механічні властивості. Перліт найбільш пластичний, але твердість і міцність його нижче, ніж у інших структур. У міру підвищення дисперсності будови міцність зростає, а пластичні властивості знижуються.

Механічні властивості вуглецевих сталей, в основному, залежать від вмісту в них вуглецю. Його збільшення призводить до зміни структури сталей, зокрема, до зменшення кількості фериту, збільшення кількості перліту і появи (в заевтектоїдних сталях) цементиту вторинного по межах зон перліту.

Кожна з цих структурних складових має певні механічні властивості: для фериту характерні висока пластичність (δ , ψ); низька міцність і низьке значення твердості (НВ), для цементита, навпаки, висока твердість, але низькі значення пластичності, він крихкий. Перліт, що складається з дрібнодисперсних частинок фериту і цементиту, має найбільш високе значення міцності, а пластичність і твердість середні. У табл. 2.1 наведені чисельні значення механічних властивостей цих структурних складових сталей.

Таблиця 2.1 - Фази і структурні складові сплавів заліза з вуглецем

	Ферит	Аустеніт	Цементит	Графіт	Перлит	Ледебурит
Сутність	твердий розчин впровадження вуглецю в альфа-залізі	твердий розчин впровадження вуглецю в гамма-залізі	хімічна сполука заліза з вуглецем	чистий вуглець	механічна суміш фериту і цементиту	механічна суміш аустеніту і цементиту
Позначення	Φ або α -Fe(C)	A або γ -Fe(C)	Ц або Fe ₃ C	Г	$\Pi = \Phi + \text{Ц}$ $+ \text{Ц} = \text{Fe}_\gamma(\text{C}) + \text{Fe}_3\text{C}$	$\text{Л} = \text{A} + \text{Ц}$ $= \text{Fe}_\gamma(\text{C}) + \text{Fe}_3\text{C}$
Твердість НВ	80-100	160-200	800	3	160	600-700
Вміст вуглецю, %	до 0,02	до 2,14	6,67	100	0,8	4,3

При охолодженні ледебурита до температури в 727° С аустеніт, що входить до його складу, стає нестійким і розпадається, перетворюючись в перліт. Таким чином, при температурі менше 727° С аж до 20° С ледебурит являє собою механічну суміш перліту з

цементитом.

Знаючи кількість кожної структурної складової і її механічні властивості, можна, користуючись правилом адитивності (складання), приблизно розрахувати механічні властивості сталі. Кількість структурних складових при цьому визначається візуально під мікроскопом за площею, займаною структурною складовою, в поле зору мікроскопа. Наприклад, якщо при розгляді структури 60% площі займає ферит і 40% - перліт, то механічні властивості сталі визначаються так:

$$HB = \frac{60\% \cdot HB_{\text{(фериту)}} + 40\% \cdot HB_{\text{(перліту)}}}{100\%} = \frac{60\% \cdot 800 + 40\% \cdot 2000}{100\%} = 1280 \text{ МПа},$$

$$\sigma_B = \frac{60\% \cdot \sigma_B_{\text{(фериту)}} + 40\% \cdot \sigma_B_{\text{(перліту)}}}{100\%} = \frac{60\% \cdot 300 + 40\% \cdot 800}{100\%} = 500 \text{ МПа},$$

$$\delta = \frac{60\% \cdot \delta_{\text{(фериту)}} + 40\% \cdot \delta_{\text{(перліту)}}}{100\%} = \frac{60\% \cdot 40 + 40\% \cdot 10}{100\%} = 28\%.$$

З огляду на, те що ферит, перліт і цементит мають цілком певний вміст вуглецю, можна, користуючись тим же правилом, по виду мікроструктури визначити вміст вуглецю у сталі. Для розглянутого прикладу:

$$C = \frac{60\% \cdot C_{\text{фериту}} + 40\% \cdot C_{\text{перліту}}}{100\%} = \frac{60\% \cdot 0 + 40\% \cdot 0,8}{100\%} = 0,32\%$$

Міцність у доевтектоїдних сталей зростає зі збільшенням в ній вуглецю, досягає максимальних значень в сталях з вмістом вуглецю 0,8 - 1%, а потім, з подальшим збільшенням вуглецю, знижується, так як по межах зерен перліту з'являється крихкий цементит вторинний, що і послаблює опір сталі розриву; твердість при цьому продовжує збільшуватися.

Вплив вуглецю на механічні властивості сталей в не загатованому стані підтверджується експериментальним графіком, наведеному на рис. 2.13, з якого випливає, що чим більше вуглецю в сталі, тим вона твердіше, але менш пластична.

Мартенситні перетворення (третє основне перетворення)

Якщо охолоджувати аустеніт зі швидкістю більше, ніж V_k (див.

рис. 2.6), то це призведе до утворення мартенситу.

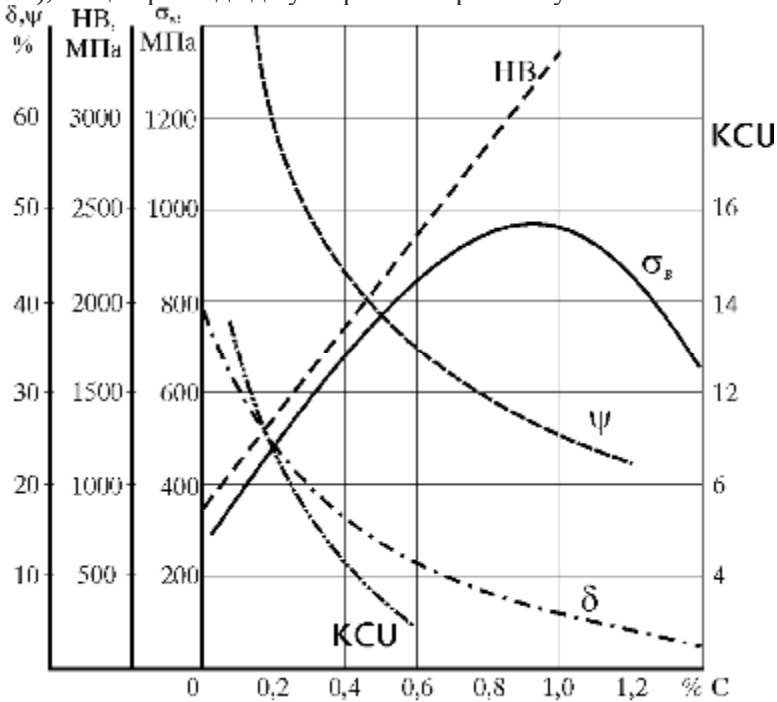


Рисунок 2.13 - Вплив вуглецю на механічні властивості сталей

Тобто якщо аустеніт переохолодити до таких температур, коли γ -решітка, незважаючи на наявність розчиненого в ній вуглецю, нестійка, але швидкість дифузії вуглецю внаслідок низьких температур досить мала, то відбувається перебудова решітки без виділення вуглецю - мартенситні перетворення

Мартенсит (названий на честь німецького вченого А. Мартенса) це упорядкований перенасичений твердий розчин вуглецю в Fe_α , так як розчинність вуглецю в α -фазі всього $\approx 0,01\%$, то мартенсит є пересиченим твердим розчином.

Так як перетворення бездифузійне, то вуглець з розчину не виділяється і під час перетворення відбувається тільки перебудова атомів заліза. Розташовані в аустеніті у вигляді гранецентрованого

куба, вони перебудовуються під час перетворення в об'ємноцентровані ґратки.

Тобто механізм мартенситного перетворення полягає в тому, що атоми вуглецю, присутні в решітці аустеніту, зберігають таке ж становище і в решітці заліза- α (мартенситі). У той же час перебудова кристалічної решітки здійснюється шляхом зсуву (рис. 2.14). Зсувний механізм перетворення характеризується закономірним кооперативним спрямованим зміщенням атомів заліза. Групи атомів зміщуються щодо інших на відстані, що не перевищують міжатомні, зберігаючи взаємне сусідство. На поверхні металевго шліфа виникає микрорельєф. Перебудова кристалічної решітки аустеніту в мартенсит відбувається по певних кристалографічних площинах, будова яких у обох решіток збігається, а параметри близькі за своїми значеннями. В результаті утворюється когерентний зв'язок між кристалічними ґратами аустеніту і мартенситу. Швидкість утворення і зростання кристалів мартенситу дуже велика (100 м/с).

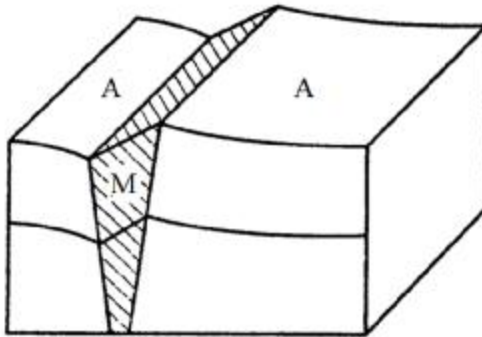


Рисунок 2.14 – Схема перебудови кристалічної решітки аустеніту в мартенсит шляхом зсуву

Для кристалічної структури мартенситу характерна тетрагональність (рис. 2.15), тобто співвідношення осей c/a в решітці мартенситу більше одиниці (рис. 2.16), що є прямим наслідком вмісту в ньому вуглецю.

Прийнято виділяти два типи мартенситу:

а) дислокаційний, нерідко його називають рейковим (рис. 2.17 а). Він формується в середньо- і маловуглецевих, а також високолегованих сталях. У них мартенситні перетворення починається при температурі понад 300° С. Кристали мартенситу в такій ситуації

витагнуті в одну сторону, представляючи собою рейки товщиною від 0,2 до 2 мкм. Такі рейки поділяються тонкими (від 10 до 20 нм) шарами аустеніту.

б) двійниковий, або пластинчастий (рис. 2.17б). Даний тип характерний для легованих і вуглецевих сталей (перетворення мартенситу в них можливо при температурі менше 200°C). Пластини голчастої мікроструктури розділяються мідрібом - середньою лінією високої підвищеної травленості (рис. 2.18). Кожен мідріб при цьому включає в себе безліч двійників по площинах.

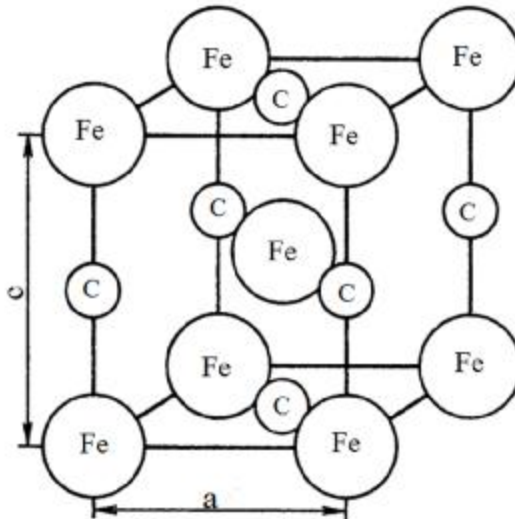


Рисунок 2.15 - Кристалічна решітка мартенситу (об'ємноцентрована тетрагональна)

Мартенситне перетворення відбувається при безперервному охолодженні в інтервалі температур від M_{Π} до M_K . Вони позначені на діаграмі (див. рис. 2.6) горизонтальними лініями. Ці температури називаються мартенситними точками. Кінетика утворення мартенситу може бути описана мартенситною кривою (рис. 2.19). При температурі M_{Π} з величезною швидкістю утворюється тільки певна кількість мартенситу і для подальшого перетворення сталь треба охолоджувати в інтервалі $M_{\Pi} - M_K$.

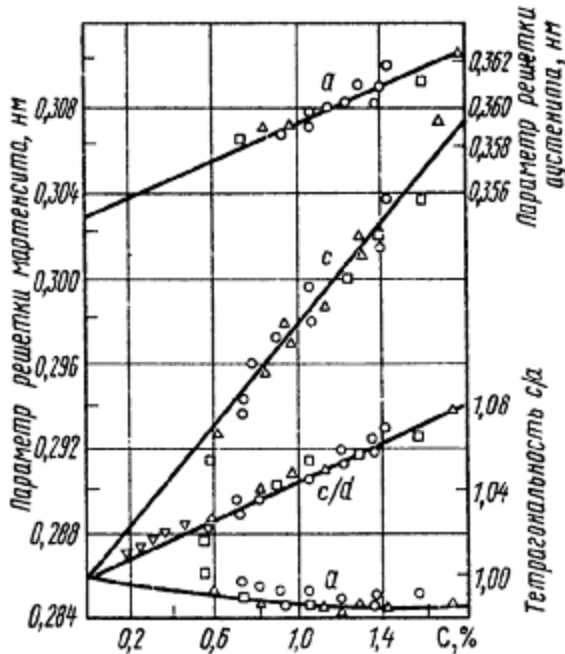


Рисунок 2.16 - Зміна параметрів решітки мартенситу в залежності від вмісту вуглецю

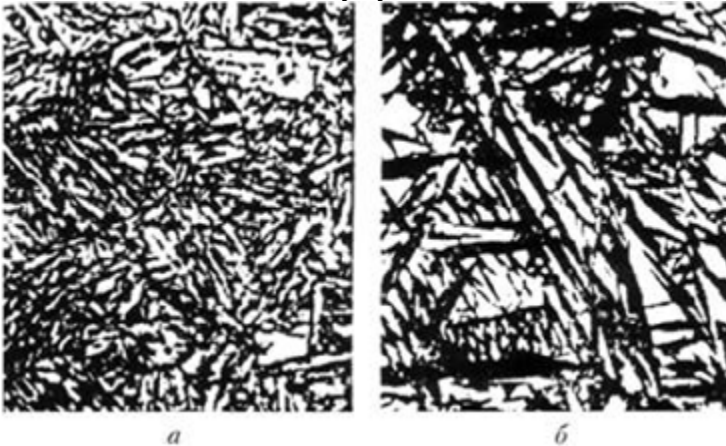


Рисунок 2.17 - Мікроструктура низьковуглецевого рейкового (а) високовуглецевого пластинчастого (голчастого) (б) мартенситу.



Рисунок 2.18 - Схема утворення мартенситу з аустеніту

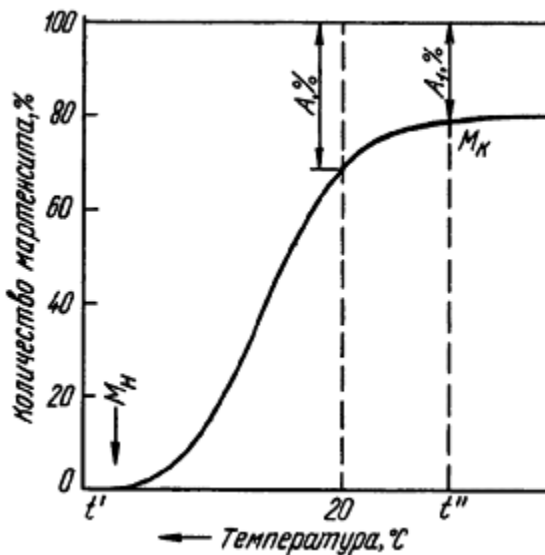


Рисунок 2.19 - Мартенситна крива

Температури точок M_s та M_f залежать від складу сталі. Вуглець дуже знижує положення мартенситних точок (рис. 2.20), тому мартенситне перетворення проходить не до кінця і в загартованих сталях, що мають точку M_f нижче ніж 20°C , присутній залишковий аустенит (рис. 2.21). Це характерно для сталей із вмістом вуглецю більше ніж $0,4\%$. Кількість залишкового аустеніту буде більшою при вищій масовій частці вуглецю в ньому і меншій температурі точок M_s і M_f .

У сталі з $0,6\text{--}1,0\%$ вуглецю масова частка залишкового аустеніту не перевищує 10% , а в сталі з $1,3\text{--}1,5\%$ вуглецю досягає $30\text{--}50\%$. У деяких сталях, наприклад, із $2,0\%$ вуглецю і 12% хрому

масова частка залишкового аустеніту може складати 80–100%.

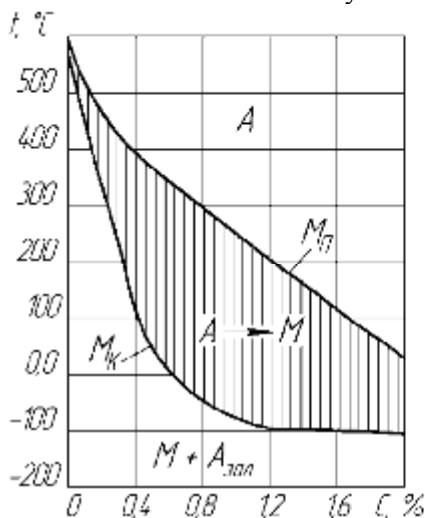


Рисунок 2.20 — Залежність температури мартенситних точок від вмісту вуглецю в сталі

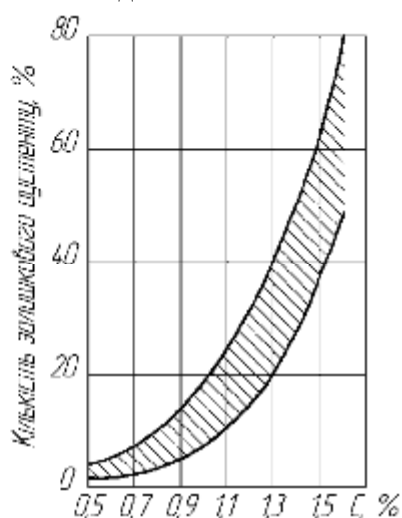


Рисунок 2.21 — Залежність масової частки залишкового аустеніту від вмісту вуглецю

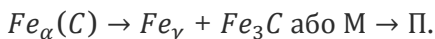
Характерна особливість мартенситу — високі твердість та міцність, які підвищуються зі збільшенням вмісту вуглецю. У сталі з 0,6–0,7% вуглецю твердість складає HRC 65, що набагато більше за твердість фериту. Але зі збільшенням вмісту вуглецю в мартенситі підвищується схильність його до крихкого руйнування. У зв'язку із цим для заевтектоїдної сталі не використовують повне гартування з нагріванням вище критичної точки A_{c2} , а нагрівають перед гартуванням сталь на 30–50° С вище за температуру точки A_{c1} . У цьому випадку частина вуглецю залишається в надлишковому цементиті, й ступінь викривлення ґратки α -заліза зменшується. При цьому твердість загартованої сталі залишається високою.

Оскільки мартенситне перетворення є бездифузійним, швидкість охолодження не впливає на температуру перетворення.

Кристали мартенситу когерентно пов'язані з кристалами вихідної фази. Зрушення атомів утворює голчастий мікрорельєф на поверхні металевого шліфа. тому мартенсит називають дрібногочастим, рейковим і т.д. в залежності від вихідної структури аустеніту.

Аустеніт і мартенсит мають різну кристалічну решітку і різний питомий об'єм, тому відбувається зростання пружних напружень у всій деталі. Це необхідно враховувати при їх термічній обробці, так як об'єм мартенситу більше об'єму аустеніту.

IV. Перетворення мартенситу в перліт, точніше, в ферито-карбідну суміш протікає при його відпуску



Воно відбувається при всіх температурах, так як вільна енергія мартенситу більше вільної енергії перліту при всіх температурах (див. рис. 2.2).

Перетворення перліту в мартенсит неможливо, так як при всіх температурах мартенсит має більшу вільну енергію, ніж перліт.

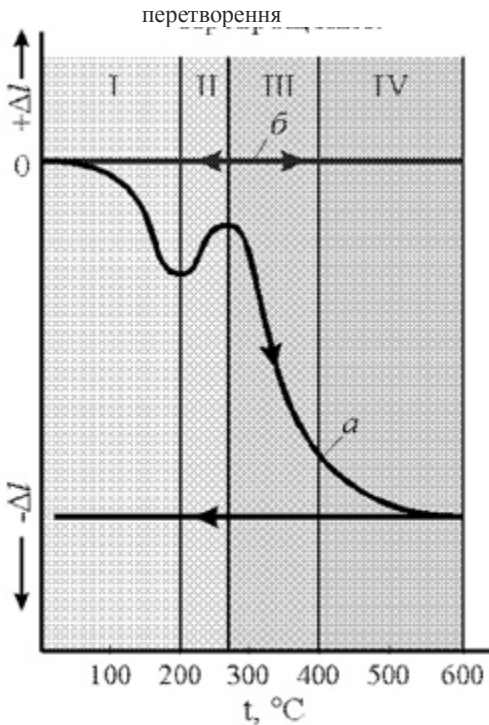
Дилатометрична крива **а** (рис. 2.22) фіксує перетворення при відпуску. Дилатометр - це прилад, за допомогою якого вивчаються зміни довжини зразка при нагріванні і охолодженні.

Якщо нагрівати в дилатометрі відпалений зразок, то при відсутності перетворень прилад буде креслити горизонтальну лінію **б**. Відхилення лінії, **а** у загартованої сталі від горизонтальної лінії **б** свідчить про наявність якихось перетворень.

До температури $\approx 80^{\circ}\text{C}$ ніяких перетворень не відбувається. З 80°C до 200°C спостерігається скорочення довжини зразка. Це так зване перше перетворення при відпуску. Рентгенівський аналіз встановив, що в цьому температурному інтервалі поступово зменшується параметр **с** решітки мартенситу. При такому низькому відпуску мартенсит, у якого відношення **с/а** хоча і не дорівнює одиниці, але близько до неї, називається відпущеним мартенситом. Отже, перше перетворення є перетворення тетрагонального мартенситу у відпущений, майже кубічний.

Подальший нагрів вище 200°C веде до іншого перетворення викликає розширення сталі. Це, так зване, друге перетворення при відпуску, захоплює інтервал температур $200-300^{\circ}\text{C}$. У цьому інтервалі залишковий аустеніт перетворюється в гетерогенну суміш, що складається з пересиченого α -розчину і карбіду, тобто залишковий аустеніт перетворюється у відпущений мартенсит. Це перетворення дифузне (залишковий аустеніт розпадається на дві фази різної

концентрації).



I - виділення вуглецю з розчину; II - розпад залишкового аустеніту;
III - зняття внутрішніх напружень; IV - процес коагуляції карбідних частинок
а - загартована сталь, б - відпалена сталь

Рисунок 2.22 - Дилатометричні криві відпустки вуглецевої сталі (1,2% C).

До кінця другого перетворення, тобто при 300° C, α -твердий розчин містить ще близько 0,15-0,20% C. При подальшому підвищенні температури настає стиснення, що вказує на повне виділення вуглецю з розчину і зняття внутрішніх напружень, які виникли в результаті попередніх перетворень, що супроводжуються об'ємними змінами. Одночасно з цим карбід відокремлюється і перетворюється в цементит (Fe_3C). Сума цих змін характеризує, так зване, третє перетворення при відпустці. При ньому відбувається ряд змін, що призводять до зняття внутрішніх напружень і карбідним перетворенням.

При 400° С третє перетворення закінчується, і сталь складається з фериту і цементиту. Подальше підвищення температури веде до коагуляції частинок фериту і цементиту, вони мають ті ж назви, що і структури, отримані в результаті прямого розпаду аустеніту на ферит і цементит.

Сталь, відпущена при 350-500° С має структуру троостита, при 500-600° С - сорбіт.

Спостерігається суттєва різниця в суміші фериту і цементиту, отриманих в результаті розпаду аустеніту або мартенситу. У феритно-цементитної суміші (троостит гарту або сорбіт гарту), що виходить при розпаді аустеніту, цементит має пластинчасту форму, а при розпаді мартенситу при температурі 400° С цементит має зернисту форму. Різна форма цементиту в феррито-цементитної суміші зумовлює і відмінність у властивостях. Відношення c/a спрямовується до одиниці.

З КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. Як діляться сталі в залежності від хімічного складу і за призначенням?
2. Що таке евтектика?
3. Як можна прогнозування структуру сталей і призначення режимів термообробки?
4. Наведіть загальноприйняті позначення критичних точок.
5. Які основні перетворення спостерігаються при термообробці сталі?
6. З чим пов'язані основні перетворення в сталях?
7. Як відбувається перетворення перліту в аустеніт?
8. Як відбувається перетворення аустеніту в перліт?
9. Як відбувається перетворення аустеніту в мартенсит?
10. Як відбувається перетворення мартенситу в перліт?
11. Покажіть графічно вплив температури на кінетику утворення аустеніту в евтектоїдній вуглецевій сталі.

12. Як розрізняють типи за схильністю сталей до росту зерна?
13. Як можна оцінювати величину зерна?
14. Що означають точки M_n і M_k ?
15. Як будується діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту?
16. Від чого залежать властивості і будова продуктів перетворення аустеніту?
17. Чим відрізняється структура продуктів перетворення аустеніту?
18. З чого складається мікроструктура доевтектоїдної, евтектоїдної і заевтектоїдної сталі?
19. Чим бейніт схожий на перліт і чим відрізняється?
20. В яких формах зустрічається бейніт і чим вони відрізняються, від чого залежать?
21. Від чого, в основному, залежать механічні властивості вуглецевих сталей?
22. Що таке правило адитивності?
23. Як можна визначати механічні властивості сталі, знаючи які в її структурі площі займає ферит і перліт?
24. В чому полягає механізм мартенситного перетворення?
25. В чому особливості кристалічної структури мартенситу?
26. На які типи прийнято розділяти мартенсит?
27. Як змінюють параметри решітки мартенситу в залежності від вмісту вуглецю?
28. Що таке і в яких координатах будується мартенситна крива?
29. Від чого залежать температури мартенситних точок в вуглецевих сталях?
30. Від чого залежить масова частка залишкового аустеніту в вуглецевих сталях?
31. Для чого призначений дилатометр?
32. Поясніть, які процеси відбуваються при відпуску вуглецевої сталі за допомогою дилатометричних

4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ

1. Загартовані та шліфовані зразки доєвтектоїдної, евтектоїдної і заєвтектоїдної сталі розмірами 60 x 60 x 5 мм
2. Набір шліфувальних шкур та алмазної пасти.
3. Реактиви для травлення.
4. Прилад ПМТ-3.
5. Мікроскоп NU-2.
6. Прилади для виміру твердості за Роквеллом та Віккерсом.

5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Верстати і прилади, які використовуються при виконанні даної роботи підключаються до мережі змінного струму напругою 380 і 220 В. Тому існує небезпека ураження електричним струмом, а також травмування зразком при його поліруванні або шліфуванні. Для попередження нещасних випадків, а також пошкодження приладів і обладнання, необхідно виконувати певні вимоги безпеки:

1. Приступати до роботи після проходження інструктажу з техніки безпеки у керівника роботи і засвоєння матеріалу даних методичних вказівок.
2. Включати прилади тільки за вказівкою викладача або лаборанта.
3. Виконувати тільки роботу, передбачену завданням.
4. Переконатися в надійності заземлення верстата, електроізоляції кабелю і проводів.
5. Виявляти особливу уважність і акуратність при роботі.
6. Не торкатися рухомих і струмоведучих частин обладнання.
7. Працювати на верстаті із застебнутими манжетами рукавів.
8. Повідомляти викладачеві або лаборанту про виниклі несправності обладнання, не намагатися усунути їх самостійно.
9. Виконувати роботу при наявності в лабораторії не менше двох осіб.

10. Після закінчення роботи вимкнути обладнання і привести в порядок робоче місце.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

6.1. Визначається твердість поверхні зразків двома способами. Індування провести від краю зразка (не ближче 2 мм) до середини з шагом 4 мм в два ряди тобто виконати 10 -12 замірів.

6.2 Вибирається реактив і проводиться травлення шліфів на неширокій полосі (5 – 7 мм) від краю зразка до середини.

6.3 Вивчається структура в різних місцях травленої полоси.

6.4 Визначається мікротвердість.

6.5 Оформлюється звіт

7 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Найменування і мета роботи.
2. Характеристика матеріалу, який досліджується, його призначення.
3. Фото мікроструктур їх опис.
4. Опис структур напиленого металу з вказівкою основних ознак структурних складових.
5. Побудувати криві зміни твердості від краю до середини зразка.
6. Висновки.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Сологуб М. А. Матеріалознавство та технологія матеріалів: Підруч. - К.: НУХТ, 2015. - 399 с.

2. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник/ В. Б. Арзамасов, А. Н. Волчков, В. А. Головин, В. А. Кузнецов.- 3-е изд.-М.: Академия, 2011. - 448с.

3. Технологія конструкційних матеріалів: підруч. / М.А. Сологуб, І.О. Рожнецький, О.І. Некоз та ін.; за ред. М.А. Сологуба. – 2-ге вид., перероб. і допов. – К.: Вища шк., 2002. — 374 с.

4. Попович В.В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавства. – Львів: Світ, 2006. – 264 с.

5. Гуляев А.П. Инструментальные стали. Справочник. / А. П. Гуляев, К. А. Малинина, С. М. Саверина. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1975. - 272 с.

6. Геллер Ю.А. Инструментальные стали 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1975. — 584 с.