

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»



Кафедра конструювання технічної естетики і дизайну

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з дисциплін **«Прикладне матеріалознавство»**
для магістрів спеціальності 132 «Матеріалознавство»

Дніпро
2021

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Прикладне матеріалознавство» для магістрів спеціальності 132 «Матеріалознавство» / Укладачі: Д.В. Лаухін, Н.О. Ротт – Дніпро: НТУ ДП, 2021

Затверджено на засіданні кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, протокол №1 від 28 серпня 2021 р.

Схвалено та рекомендовано до друку науково-методичною комісією зі спеціальності 132 Матеріалознавство механіко- машинобудівного факультету НТУ «Дніпровська політехніка» (протокол №1 від 06.10.2021 р.)

Затвержено до видання редакційною радою НТУ «ДП» (протокол № 12 від 21.12.2021).

Зміст

Лабораторна робота № 1. Вивчення діаграми стану сплавів системи залізо – вуглець.....	4
Лабораторна робота № 2. Класифікація сталей	16
Лабораторна робота № 3. Визначення твердості металевих зразків	22
Лабораторна робота № 4. Макроскопічний аналіз.....	28
Лабораторна робота № 5. Мікроскопічний аналіз.....	37
Лабораторна робота № 6. Мікроаналіз залізовуглецевих сплавів(сталей) в рівноважному стані і після гартування	42
Список рекомендованої літератури.....	48

Лабораторна робота № 1

Вивчення діаграми стану сплавів системи залізо – вуглець

Мета роботи: вивчення діаграми стану залізовуглецевих сплавів, аналіз перетворень, які проходять у сплавах при охолодженні та нагріванні, визначення фазового та структурного стану сплавів залежно від їх складу та температури.

Матеріали та обладнання. Для виконання даної лабораторної роботи студентам роздаються діаграми стану Fe-C з описанням механізму формування структур типових сплавів в цій системі.

1.1. Теоретичні відомості

Найважливішими матеріалами в сучасній машинобудівній промисловості є залізовуглецеві сплави: технічне залізо, сталі та чавуни. Основою для вивчення процесів формування їх структури є діаграма стану системи Fe-C (рис. 1. 1).

Структура сплаву визначає його властивості. Важливо знати, які фази та структури формуються в сплавах залежно від їх складу та температури. Необхідно вміти керувати процесом структуроутворення для забезпечення експлуатаційних властивостей сплавів.

Компонентами залізовуглецевих сплавів є *залізо* та *вуглець*, який може знаходитись у сплавах у хімічно зв'язаному стані у вигляді *цементиту* – Fe_3C (Ц) або у вільному стані – у вигляді *графіту* (Г). Залежно від цього структуроутворення залізовуглецевих сплавів при їх охолодженні з рідкого стану можна розглядати за діаграмою метастабільної рівноваги $Fe - Fe_3C$ (рис. 1. 1, суцільні лінії) або за діаграмою стабільної рівноваги $Fe - C$ (рис. 1. 1, пунктирні лінії C^1D^1 , $E^1C^1F^1$, E^1S^1 , S^1K^1).

Залізо плавиться при температурі $1539\text{ }^{\circ}C$, його густина при кімнатній температурі $7,68 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$. Залізу властивий поліморфізм, тобто залежно від температури воно має різну кристалічну будову.

При кристалізації ($1539\text{ }^{\circ}C$) утворюється δ -Fe, кристалічна будова якого описується об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) ґраткою. При $1392\text{ }^{\circ}C$ замість ґратки δ -Fe (ОЦК) шляхом перегрупування атомів утворюється γ -Fe з ґранецентрованою кубічною (ГЦК) ґраткою. При $910\text{ }^{\circ}C$ також проходить поліморфне перетворення, внаслідок якого γ -Fe

переходить в α -Fe з (ОЦК) граткою. Нижче 910°C таке залізо стає стійким аж до температури абсолютного нуля.

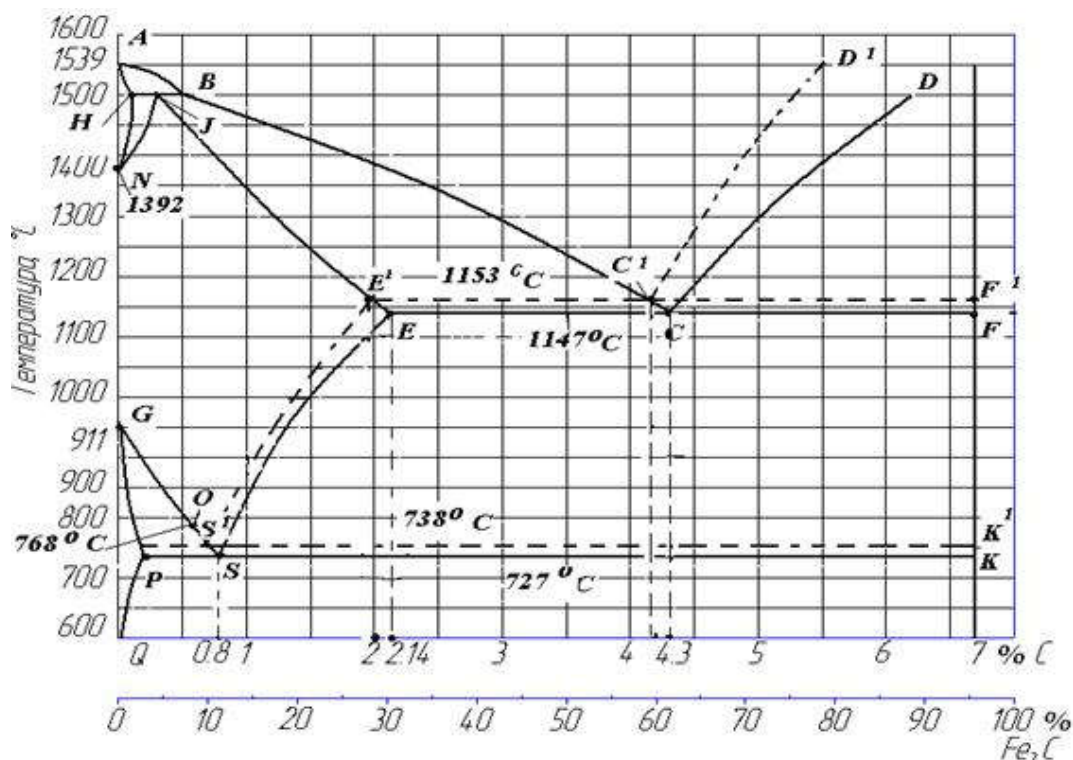


Рис. 1. 1. Діаграма стану системи залізо – вуглець

Залізо α залежно від температури може знаходитись в різноманітних магнітних станах. При температурі 768°C ($768\ldots 910^\circ\text{C}$) α -Fe, так само як і δ -Fe, і γ -Fe, – парамагнетик, тобто є немагнітним, нижче 768°C – феромагнетик (магнітне). Температура 768°C (точка Кюрі) є температурою переходу α -Fe із парамагнітного стану в феромагнітний при охолодженні заліза і навпаки – при його нагріванні. Залізо α з парамагнітними властивостями іноді називають β -Fe. Таким чином, при 1392°C в рівновазі знаходяться δ -Fe та γ -Fe ($\delta\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$); температура рівноваги γ -Fe та α -Fe – 910°C ($\gamma\text{-Fe} \rightleftharpoons \alpha\text{-Fe}$).

Температури рівноважного стану двох чи декількох фаз називаються критичними. Їх позначають літерою А з відповідним індексом (порядковий номер температури зростає з її підвищенням). Для заліза: 768°C – A_2 ; 910°C – A_3 ; 1392°C – A_4 .

Залізо з вмістом вуглецю $0,01\ldots 0,1\%$ має такі властивості: твердість за Брінелем $70\ldots 80\text{ НВ}$; міцність на розрив $\sigma_b = 200\ldots 250\text{ МПа}$; відносне звуження $\delta = 50\ldots 55\%$; ударна в'язкість $KCU^{+20} = 220 \ldots 250\text{ кДж/м}^2$. Цементит містить $6,67\%$ вуглецю і має високі твердість і крихкість, його

міцність на розтяг дуже мала. Цементит – метастабільна (нестабільна) фаза, слабо феромагнітна, точка Кюрі (A_0) – 210°C . Час стійкості цементиту зменшується з підвищенням температури: при низьких температурах він існує нескінченно довго, при температурах, які перевищують 950°C , за декілька годин розпадається на залізо та графіт. На цьому явищі заснований відпал білого чавуну на ковкий.

Графіт – одна із двох кристалічних модифікацій вуглецю. Його температура плавлення 3850°C .

В залізовуглецевих сплавах графіт, на відміну від цементиту, є стабільною фазою. Сплавляючи залізо з вуглецем, отримуємо сплави з різноманітною структурою та властивостями.

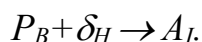
При підвищених швидкостях охолодження сплавів у результаті процесу кристалізації утворюється цементит. Утворення графіту спостерігається тільки в високовуглецевих сплавах у випадку їх повільного охолодження або при деяких ізотермічних витримках. В сплавах із зниженим вмістом вуглецю утворення графіту малоімовірне.

На діаграмі метастабільної рівноваги крайні ординати відповідають чистим компонентам: GNA – залізу, KFD – цементиту. Ординати між ними – подвійним сплавам, загальний вміст заліза й вуглецю в яких дорівнює 100% . Для заліза на лінії GNA точка A відповідає температурі плавлення (1539°C); N – перетворенню $\delta\text{-Fe} \Leftrightarrow \alpha\text{-Fe}$; G – перетворенню $\gamma\text{-Fe} \Leftrightarrow \alpha\text{-Fe}$. Для цементиту: D – температура плавлення (точно не встановлена).

У системі $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ можливі: рідка фаза — розчин заліза й вуглецю та чотири твердих – δ – та α – тверді розчини – **ферит** (Φ), γ – твердий розчин – **аустеніт** (A), і цементит Fe_3C . Ліквідус – $ABCD$; солідус – $ANIECF$.

Затвердівання сплавів, які містять до $0,5\% \text{ C}$, починається з утворення δ – фериту за реакцією $P_{(AB)} \rightarrow \delta\text{-ферит} (\Phi_{(AH)})$ (див. рис. 5.1). Характер подальшої кристалізації сплавів залежить від вмісту в них вуглецю. Сплави з вмістом до $0,1\% \text{ C}$ (до точки H), повністю тверднуть в інтервалі температур, який відповідає лініям AB та AN з утворенням однофазної структури δ – фериту. Цій структурі відповідає ділянка діаграми, що знаходиться зліва від лінії AHN .

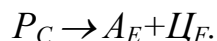
Сплави з $0,1 \dots 0,5\% \text{ C}$ (між точками H і B) кристалізуються дещо складніше. Після виділення з рідини відповідної кількості фериту при температурі 1499°C (ізотерма HIB) вони зазнають перитектичного перетворення:



У сплаві, який містить 0,16 % C (I), обидві вихідні фази ($P + \delta$ -ферит), взаємодіючи між собою при перитектичному перетворенні, без залишку витрачаються на утворення γ -твердого розчину (аустеніту). Після цього сплав набуває однофазної структури – аустеніт. В сплавах, які містять від 0,1 (H) до 0,16 % C (I), після перитектичної реакції залишається в залишку частка δ -фериту, який при подальшому охолодженні сплаву (в результаті перетворення ґратки ОЦК в ГЦК) в інтервалі температур, які відповідають лініям HN та IN, перетворюється в аустеніт: $\delta_{(HN)} \rightarrow \gamma_{(IN)}$ ($\Phi \rightarrow A$). Сплави з вмістом вуглецю 0,16...0,5% остаточно тверднуть в інтервалі температур ліквідус (BC) – солідус (IE), при яких залишкова рідина кристалізується в аустеніт: $P_{(BC)} \rightarrow A_{(IE)}$. Цією ж реакцією також описується процес затвердіння сплавів із вмістом вуглецю 0,5...2,14% C.

Таким чином усі сплави, які містять менше 2,14 % C, після першої кристалізації отримують однофазну структуру – аустеніт, яка зберігається при охолодженні до температур, відповідних лінії GSE. При подальшому охолодженні проходить перекристалізація аустеніту, в результаті чого формується кінцева структура сплавів.

У групі сплавів, які містять від 2,14 (E) до 6,67 % C (F), існує евтектичний сплав з 4,3 % C (точка C), який при 1147 °C (ізотерма ECF), є одночасно насиченим вуглецем і залізом, кристалізується за евтектичною реакцією:



Утворена евтектична суміш двох фаз ($A + \text{Ц}$) називається **ледебуритом**.

Сплави доевтектичні 2,14 (точка E)...4,3 % C (точка C) і заевтектичні 4,3...6,67 % C кристалізуються в два етапи. На першому в інтервалі температур ліквідус (BCD) – солідус (ECF) із рідкої фази виділяються первинні кристали: в доевтектичних – аустеніт (A), в заевтектичних – цементит (Ц)_I. На другому етапі рідина, що залишилась, твердне з утворенням евтектики – ледебурит (цементит + аустеніт). В результаті первинної кристалізації доевтектичні сплави мають структуру $A_E + \text{Л}$, заевтектичні – $\text{Ц}_I + \text{Л}$. До- і заевтектичні сплави після первинної кристалізації мають дві фази – аустеніт і цементит.

Лінія AHN (див. рис. 5.1) показує границю розчинності вуглецю в δ -Fe, лінія GPQ – в α -Fe, лінія ES – в γ -Fe. Таким чином, максимальна розчинність вуглецю в δ -Fe становить 0,1 % (точка H, температура 1499°C), в α -Fe – 0,02% C при 727 °C (точка P) і 0,01% C при 600 °C (Q); в γ -Fe – 2,14% (точка E).

Сплави заліза з вуглецем, якого в сплаві менше 0,02%, називаються **технічним залізом**. Справа від лінії GPQ ферит є пересиченим твердим розчином, на лінії GPQ він гранично насичений вуглецем. При охолодженні сплавів, розташованих на діаграмі справа від PQ , нижче $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ із фериту виділяється надлишковий вуглець, що приводить до формування цементиту третинного ($Ц_{III}$) у вигляді сітки на границях зерен фериту. Структура технічного заліза показана на рис. 5.3, а. Якщо в структурі сплавів (0,02...6,67 % C) уже є цементит, то $Ц_{III}$ нашаровується на нього і металографічним методом не визначається.

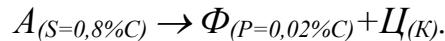
Лінія ES показує границю насичення аустеніту вуглецем залежно від температури сплаву. Розчинність вуглецю максимальна при $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка E) – 2,14%. В результаті аустеніт у сплавах, вміст вуглецю в яких більше 0,8% (точка S), справа від лінії ES виявляється перенасиченим твердим розчином і з нього виділяється вуглець, який іде на утворення цементиту вторинного ($Ц_{II}$). У сталях $Ц_{II}$ формується частіше у вигляді сітки на границях зерен аустеніту, в чавунах найчастіше нашаровується на цементиті ледебуриту.

Вуглець, розчинюючись в $ОЦК$ ґратці заліза δ і α , змінює їх і тим самим знижує температурну стійкість цих структур. Тому, чим більше вуглецю розчинено в $\delta\text{-Fe}$, тим при більш високих температурах ґратка δ перетворюється в γ - ґратку; чим більше вуглецю в сплаві, тим при більш низьких температурах аустеніт перетворюється в $\alpha\text{-ферит}$. Таким чином, розчинення вуглецю в залізі спричиняє підвищення температури A_4 (лінія NI) і зниження A_3 (лінія GS), розширення температурної області існування аустеніту й зниження області фериту.

При охолодженні сплавів, які містять менше 0,8 % C, перетворення аустеніту у ферит починається при температурах, що відповідають лінії GS . Це перетворення через різну розчинність вуглецю у фериті (GP) і аустеніті (ES) супроводжується дифузійним перерозподілом вуглецю між ними. Тому перебудова ґраток проходить в температурному інтервалі $GS - GP$. Ділянка PGS є ділянкою двофазної структури, в якій ферит знаходиться в рівновазі з аустенітом.

У сплавах, що розташовані між точками P та S , під час охолодження із утворенням фериту в указаному інтервалі температур аустеніт збагачується вуглецем (GS). При $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ вміст вуглецю в аустеніті на заключному етапі досягає 0,8 % (S), ґратка $\gamma - \text{Fe}$ ($ГЦК$) втрачає стійкість і перебудовується в ґратку $\alpha - \text{Fe}$ ($ОЦК$), в якій при $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ розчиняється тільки 0,02% C (P).

Поліморфне перетворення $\Gamma\text{ЦК}_{(0,8\% \text{ C})} \rightarrow \text{ОЦК}_{(0,02\% \text{ C})}$ супроводжується виділенням вуглецю з розчину й утворення цементиту:



Це трифазне перетворення, обумовлене поліморфізмом заліза, що відбувається при 727°C , називається евтектоїдним. На відміну від трифазного евтектичного перетворення, при евтектоїдному вихідною фазою є не рідкий, а твердий розчин (в даному випадку аустеніт). Суміш фаз, що виділилася з твердого розчину називається евтектоїдом, при чому число фаз дорівнює числу компонентів системи. Структурна складова залізовуглецевих сплавів, яка утворюється в результаті розпаду аустеніту і яка складається із пластинок двох фаз – фериту і цементиту, що чергуються між собою, називається **перлітом** (Π). Температура утворення перліту відповідає критичній температурі A_1 .

На діаграмі метастабільної рівноваги точці A_1 відповідає лінія PSK (727°C). Евтектоїдне перетворення $A \rightarrow \Pi$, проходить в усіх сплавах, які містять більше $0,02\% \text{ C}$ (точка P), тобто в сталях і чавунах.

Сплави з вмістом вуглецю $0,02 \dots 2,14\% \text{ C}$, у структурі яких присутній перліт, називаються **сталями** (steel). Сталі поділяються на *доевтектоїдні* ($C = 0,02 \dots 0,8\% \text{ C}$, структура $\Phi + \Pi$); *евтектоїдні* ($C = 0,8\% \text{ C}$, структура *перліт*); *заевтектоїдні* ($C = 0,8 \dots 2,14\% \text{ C}$, структура $\Pi + \text{Ц}_{II}$). Схеми структур цих сталей показані на рис. 5.3.

Сплави, які містять від $2,14$ до $6,67\% \text{ C}$, у структурі яких присутня певна доля евтектики – ледебуриту, називаються **чавунами**. Вони поділяються на *доевтектичні* ($C = 2,14 \dots 4,3\% \text{ C}$, структура $\Pi + \text{Л}$); *евтектичні* ($C = 4,3\% \text{ C}$, структура - ледеburит); *заевтектичні* ($C > 4,3\% \text{ C}$, структура $\text{Ц}_I + \text{Л}$).

Цементит третинний в сталях і чавунах, а також цементит вторинний в евтектичному і заевтектичному чавунах як самостійні структурні складові при мікроструктурному аналізі зазвичай не визначаються.

Необхідно зазначити, що всі описані зміни структури, що проходять при охолодженні сплавів, повторюються і при нагріванні сплавів (у зворотному порядку). Це справедливо лише в тому випадку, коли охолодження і нагрівання проходять із дуже малими швидкостями, і при будь-якій температурі всі можливі перетворення повністю завершені й сплави знаходяться в стані фазової рівноваги.

Про фазові перетворення можна судити з кривих їх охолодження або нагрівання. Як приклад розглянемо процес структуроутворення в сталі з $0,4\% \text{ C}$ (рис. 1. 2). Вище точки I сталь знаходиться в рідкому стані і безперервно

оохолоджується. В інтервалі температур 1-2 із рідкої фази, склад якої змінюється по ліквідусу AB , випадають кристали δ – фериту, склад яких визначається по солідусу AN . За правилом фаз $C=2-2+1=1$, $t \neq const$. При кристалізації виділяється тепло, на ділянці кривої 1-2 оохолодження сплаву зменшується. При температурі точки 2 проходить трифазне перитектичне перетворення: $P_B + \delta_H \rightarrow A_I + P(\text{залишок})$; $C=2-3=1=0$, $t=const$.

Залишкова рідина кристалізується при безперервному оохолодженні в інтервалі температур 2-3 з утворенням аустеніту. В інтервалі 3-4 сплав має структуру A (аустеніту), безперервно оохолоджується. При температурах 4-5 проходить поліморфне перетворення, ГЦК перебудовується в ОКЦ гратку і з аустеніту виділяються кристали α -фериту.

При температурі точки 5 проходить трифазне евтектоїдне перетворення $A_{(S)} \rightarrow \Phi_{(P)} + \Pi_{(K)}$, коли з аустеніту, не перетвореного у ферит, утворюється **евтектоїд – перліт** ($\Phi + \Pi$). У процесі подальшого оохолодження сплаву з фериту виділяється Π_{III} , який нашаровується на цементиті перлітному. Структура сталі оохолодженої нижче температури точки 5 (до точки 6) – $\Phi + \Pi$ (рис. 1. 3, а).

Масові долі (%) фериту й перліту як структурних складових сталей можуть бути визначені за правилом відрізків. Наприклад, при $600^\circ C$ $\Phi = (0,8 - 0,4) / (0,8 - 0,01) 100 = 50\%$, а перліту $\Pi = (0,4 - 0,01) / (0,8 - 0,01) 100 = 50\%$. Масова доля фериту як фази, що існує разом із цементитом, $\Phi = (6,67 - 0,4) / (6,67 - 0,01) 100 = 94\%$. Решта 6 % належать іншій фазі – цементиту.

Таким чином, структура, що містить 0,4% C , складається із 50 % фериту і 50% перліту (відповідно до фазового аналізу - 94 % $\Phi + 6\% \Pi$

Аналогічна ферито-перлітна структура (тільки з різною часткою цих складових) усіх доевтектоїдних сталей (рис. 1. 3, б).

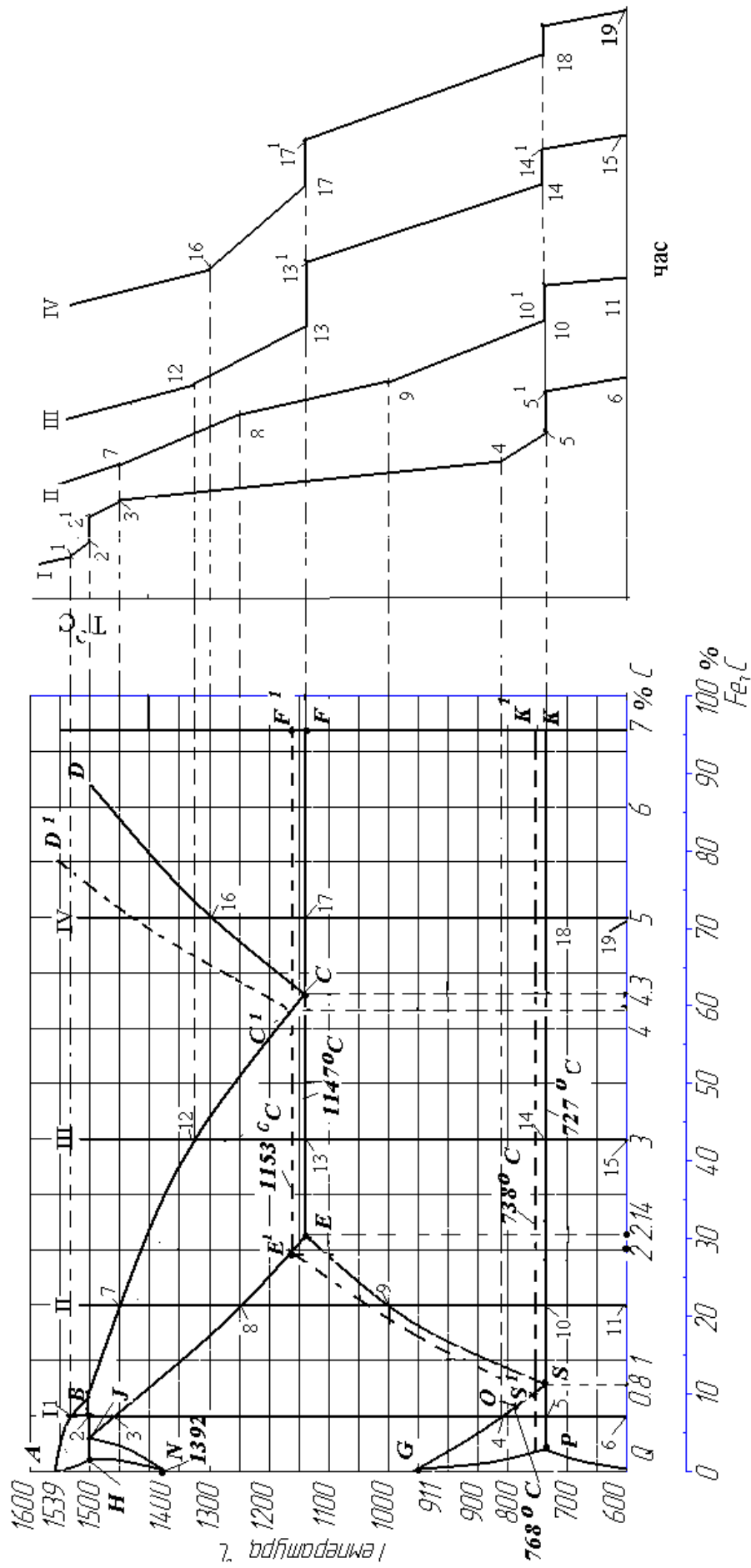


Рис. 1. 2 Діаграма стану системи “Залізо-вуглець” і криві охолодження сталей (сплави I і II) і чавунів (сплави III і IV)

Кристалізація типової заевтектоїдної сталі II з 1,5 % вуглецю (рис. 1. 2) відбувається в інтервалі температур від точки 7 до точки 8, коли з рідкої сталі з'являються зерна аустеніту. Після закінчення кристалізації від температури точки 8 до точки 9 в аустенітній області відбувається просте фізичне охолодження однофазного сплаву. Оскільки лінія ES – лінія солідусу, тобто лінія обмеженої розчинності вуглецю в γ -Fe (аустеніті), то нижче від точки 9 аустеніт стає перенасиченим вуглецем. Надлишкові атоми вуглецю виходять із ґратки аустеніту, зв'язуються з атомами заліза у хімічну сполуку – цементит. Такий цементит визначають як вторинний - Ц_{II} . Він виділяється по межах аустенітних зерен у вигляді тонкого прошарку. При охолодженні до 727°C кількість вуглецю в аустеніті зменшується до 0,8 % (від точки 9 до точки S по лінії ES) і такий аустеніт при температурі точки 10 перетворюється на перліт. Структура всіх заевтектоїдних сталей – темні зерна перліту, оточені світлими прошарками вторинного цементиту (рис. 1. 3, г).

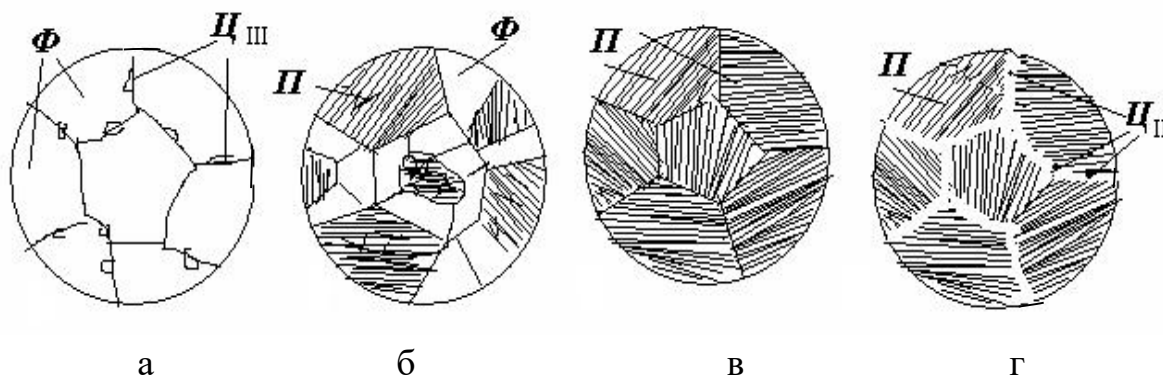


Рис. 1. 3 – Схеми структур: а – технічного заліза; б – доевтектоїдної сталі; в – евтектоїдної сталі; г – заевтектоїдної сталі

Як уже зазначалось, залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю більше 2,14% є чавунами, які поділяються на евтектичні, до- і заевтектичні.

У доевтектичних чавунах (сплав III, рис. 1. 2) первинна кристалізація відбувається в інтервалі температур між точками 12 і 13 з виділенням аустеніту. При температурі точки 13 (1147°C) проходить евтектичне перетворення $\text{P}_\text{C} \rightarrow \text{Л}(\text{A}_\text{E} + \text{Ц})$. Згідно з правилом фаз – $\text{C} = 2 - 3 + 1 = 0$ – це перетворення відбувається при постійній температурі (див. криву охолодження сплаву III).

Після закінчення цієї реакції структура сплаву буде складатися з аустеніту та ледебуриту. При зниженні температури з 1147°C до 727°C (точка 14) із аустеніту, в якому було 2,14 % C за рахунок зменшення

розчинності вуглецю до 0,8 % (точка S) виділяється вторинний цементит Ц_2 , що розміщується навколо зерен аустеніту. Такий вторинний цементит виділяється також і з аустеніту, що входить до складу ледебуриту. При температурі 727°C проходить евтектоїдне перетворення аустеніту (як первинного, так і того, що входив до складу ледебуриту) в перліт ($\text{A} \rightarrow \text{П}$), після завершення якого кінцева структура доевтектичних чавунів (рис. 1. 4, а) буде складатися з перліту (темні зерна) і плямистої структури ледебуриту (темні плями перліту на фоні світлого цементиту). Вторинний цементит зливається з цементитом ледебуриту і як окрема фаза не спостерігається.

Структура евтектичного чавуну з 4,3 % С – суто ледебуритна (рис. 1. 4, б).

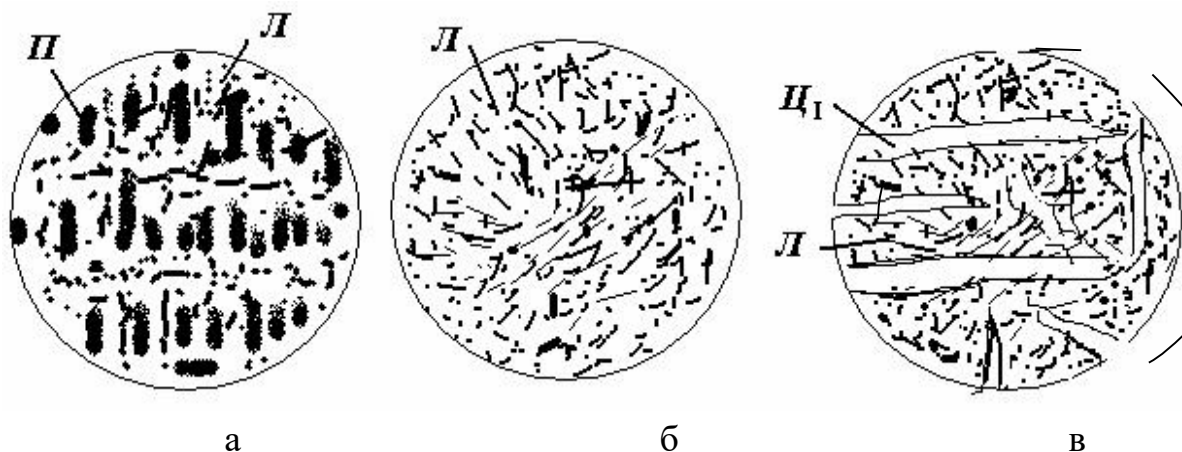


Рис. 1. 4. Схеми структур чавунів: а – доевтектичного; б – евтектичного; в – заевтектичного

Кристалізація заевтектичних чавунів (сплав IV на рис. 1. 2) починається з виділення в точці 16 кристалів первинного цементиту Ц_1 у вигляді пластин. При температурі точки 17 (1147°C) відбувається евтектичне перетворення $\text{P}_\text{C} \rightarrow \text{Л}(\text{A}_\text{E} + \text{Ц})$, після завершення якого структура буде складатися з ледебуриту і первинних кристалів цементиту. Така структура буде зберігатися аж до кімнатної (точки 19) з тією різницею, що в кінцевому ледебуриті буде не аустеніт, а перліт, який утворився внаслідок евтектоїдного перетворення при температурі точки 18 — 727°C (рис. 1. 4, в).

Ці чавуни називаються білими, оскільки в зламі мають білий сріблястий колір, який визначається наявністю в структурі цементиту.

Діаграма стабільної рівноваги, позначена на рис. 1. 2 пунктиром, відображає можливість утворення високовуглецевої фази – графіту на всіх етапах процесу структуроутворення в сплавах з підвищеним вмістом вуглецю. В інтервалі температур ліквідус DC – солідус CF із рідини

виділяється графіт. При евтектичній температурі 1153°C (ізотерма $E^1C^1F^1$) рідина складу C твердне з утворенням графітної евтектики ($A_E + \Gamma$). В інтервалі температур $ECF - PSK$ через зменшення розчинності вуглецю в аустеніті (лінія ES) виділяється графіт. При евтектоїдній температурі ($t_{PSK} = 738^{\circ}\text{C}$) вміст вуглецю в аустеніті досягає $0,7\%$ (S^1) і аустеніт розпадається на ферит і графіт.

Таким чином, при охолодженні сплавів, які включають $2,14...6,67\%$ C , формується структура, яка складається з фериту та графіту. Це так звані графітізовані чавуни.

1.2. Завдання на роботу

1. Уважно вивчити теоретичний матеріал.
2. Скласти звіт про роботу, в якому:
 - зробити рисунок діаграми стану “залізо – цементит” і нанести на неї ординату, що показує склад сплаву згідно з варіантом табл. 1.1;
 - дати точну назву вказаного сплаву;
 - показати криву охолодження сплаву (поруч з діаграмою стану);
 - описати процес кристалізації і подальшого формування структури цього сплаву з рідкого стану до кімнатної температури;
 - визначити, які фази і структурні складові будуть у сплаві при кімнатній температурі;
 - визначити кількість цих фаз і структурних складових за правилом важеля;
 - показати схему кінцевої структури сплаву з вказанням на схемі структурних складових.

Таблиця 1.1

Варіанти індивідуальних завдань

№ варіанта	% вуглецю	№ варіанта	% вуглецю	№ варіанта	% вуглецю
1	5,5	6	4,0	11	0,01
2	0,1	7	2,5	12	0,2
3	0,16	8	4,5	13	0,6
4	0,3	9	0,8	14	3,5
5	1,0	10	2,0	15	4,3

1.3. Контрольні питання для самопідготовки

1. Що визначають точки G та N на діаграмі стану залізо-вуглець?

2. Як впливає вуглець на температуру поліморфного перетворення заліза?
3. Що визначають точки A_4 , A_3 , A_2 , A_1 для чистого заліза та для його сплавів з вуглецем?
4. Які фази притаманні залізовуглецевим сплавам?
5. Які структури утворюються в залізовуглецевих сплавах?
6. Які перетворення називаються евтектичним, евтектоїдним, перитектичним в залізовуглецевих сплавах?
7. Які структури називається ледебуритом, перлітом?
8. Який цементит називається первинним, вторинним, третинним?

Лабораторна робота № 2

Класифікація сталей

Мета роботи: Ознайомитись з основними положеннями класифікації та маркірування сталей. Вибрати матеріал для конкретного виробу.

2.1. Загальні відомості

Сталі, які застосовуються в промисловості, поділяють по хімічному складу, призначенню, якості, ступеню розкислення, структурі й іншим ознакам.

По хімічному складу сталі підрозділяють на вуглецеві та леговані.

Вуглецеві сталі – сплави заліза з вуглецем (при вмісті вуглецю до 2,14 %), у яких утримуються постійні домішки марганцю, кремнію, сірки і фосфору. Зі збільшенням вмісту вуглецю твердість, міцність і пружність сталі підвищується. Але пластичність, в'язкість, оброблюваність і зварюваність знижуються.

Розрізняють низьковуглецеві (до 0,25 % C), середньовуглецеві (від 0,25 до 0,6 % C) і високовуглецеві (понад 0,6 % C) сталі.

Кремній (до 0,5 %) і марганець (до 0,75 %) не роблять істотного впливу на властивості сталі. Сірка викликає червоноламкість, тобто крихкість сталі при високих температурах, а фосфор – холодноламкість, тобто крихкість сталі при знижених температурах. Крім того, сірка знижує пластичність і міцність сталі, корозійну стійкість і зносостійкість.

Леговані сталі – сплави заліза і вуглецю, у які введені спеціальні добавки (легуючі елементи) для придання сталям певних властивостей; наприклад, хром марганець, нікель, титан, молібден, вольфрам, кобальт, ніобій, ванадій, алюміній, мідь і інші елементи. Марганець (при вмісті більш 1 %) і кремній (при вмісті більш 0,6 %) також є легуючими елементами.

Для позначення легуючих елементів використовуються літери: А – азот, Б – ніобій, В – вольфрам, Г – марганець, Д – мідь, Е – селен, К – кобальт, Л – берилій, М – молібден, Н – нікель, П – фосфор, Р – бор, С – кремній, Т – титан, Ф – ванадій, Х – хром, Ю – алюміній.

Легуючі елементи впливають на властивості сталі. Хром – один з основних легуючих елементів. Він підвищує міцність, твердість, корозійну стійкість сталі, а при підвищеному вмісті їх робить сталь нержавіючою, жароміцною та інше. Нікель додає сталі високу міцність, пластичність

корозійну стійкість і ударну в'язкість. Вольфрам збільшує твердість і червоність сталі. Молібден підвищує міцність, пружність, червоність, окислостійкість і корозійну стійкість сталі. Ніобій і мідь різко поліпшують корозійну стійкість сталі.

Розрізняють низьколеговані сталі (до 5 % легуючих елементів), середньолеговані (від 5 до 10 %) і високолеговані (понад 10 %).

За призначенням сталі розділяють на конструкційні, інструментальні та спеціальні. Конструкційні сталі застосовують для виготовлення будівельних конструкцій, деталей машин і механізмів, корпусів судин, резервуарів і т.д. Інструментальні сталі застосовують для виготовлення інструмента: що різє, вимірювального, штампів гарячого і холодного деформування.

У залежності від змісту шкідливих домішок – сірки і фосфору – сталі класифікують по якості на :

- сталі звичайної якості – вміст сірки знаходиться в межах 0,04 ... 0,06%; фосфору – 0,04 ... 0,08%;
- сталі якісні – вміст сірки і фосфору знаходиться в межах 0,03 ... 0,04%;
- сталі високоякісні – вміст шкідливих домішок менше 0,03 %.

Сталі звичайної якості, як правило, виплавляють вуглецевими і застосовують, в основному, для виробництва різних конструкцій.

Сталь звичайної якості поставляється споживачеві відповідно до діючих стандартів і її підрозділяють на три групи:

- група А – поставляють з гарантованими механічними властивостями, виготовляють сталі таких марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст5, Ст6;
- група Б – поставляють з гарантованим хімічним складом, виготовляють таких марок: БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6;
- група В – поставляють по механічних властивостях і хімічному складі, виготовляють таких марок: ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5.

У залежності від нормованих показників механічних і технологічних властивостей сталь кожної групи підрозділяють на категорії: група А – 1, 2 і 3; група Б – 1, 2; група В – 1, 2, 3, 4, 5 і 6.

По ступені розкислення ці сталі розділяють на киплячі [КП], напівспокійні [ПС] і спокійні [СП].

Вуглецеві сталі звичайної якості маркуються буквами Ст, що означає "сталь", цифри від 0 до 6 – умовний номер марки в залежності від хімічного складу і механічних властивостей, букви Б и В перед позначенням марки – групу сталі (група А в позначенні марки сталі не вказується, а мається на увазі), букви КП, ПС і СП після номера марки – ступінь розкислення. Для позначення категорії якості сталі до позначення марки додають наприкінці

номер відповідної категорії, за винятком першої, котра не ставиться, а припускається.

Наприклад, БСтЗкп2 – вуглецева сталь звичайної якості групи Б (поставляється по хімічному складу), номер марки 3, що кипить, другої категорії якості. Напівспокійна сталь з номерами 3 – 5 виплавляється також з підвищеним вмістом марганцю. У цьому випадку до позначення марки сталі після її номера ставлять букву Г: СтЗГпс, Ст5Гпс. У СтЗГпс і т.д.

Чим більше номер у марці, тим вище в ній вміст вуглецю, а, отже, твердіша і міцніша сталь.

Сталі конструкційні звичайної якості (їх ще називають «загального призначення» (табл. 2. 1.) широко застосовуються для виготовлення різноманітних деталей (вали, осі, черв'ячні колеса і т.д.) практично у всіх галузях машинобудування: автомобільному, тракторному, суднобудуванні й ін. Оскільки напружений стан виникаючи в деталях різноманітних за формою, розмірами і умовами експлуатації, може сильно відрізнятися, необхідні численні марки сталей, що відрізняються вмістом вуглецю і легуючих елементів.

Якісна сталь у порівнянні зі сталлю звичайної якості містить менше сірки і фосфору, має більш високу міцність, пластичність і опір ударним навантаженням. При постачанні гарантується її хімічний склад і механічні властивості.

Конструкційна вуглецева якісна сталь випускається наступних марок 05кп, 08кп, 08, 10кп, 10пс, 10; 15кп, 15пс, 20кп, 20пс, 20; 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60, 65. Цифри позначають середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка, а букви Г – вміст марганцю близько 1%. Букви КП позначають кипячу сталь, ПС – напівспокійну, відсутність букв – спокійну.

Конструкційні леговані сталі позначають буквами і цифрами. Букви, що входять в марку сталі означають легуючі елементи, а цифри – вміст даного елемента у відсотках. Якщо цифр за буквою немає – значить даного елемента міститься близько 1%. Цифри, що стоять перед маркою, указують вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Наприклад, 20ХН2 – хромонікелева сталь, містить 0,20 % вуглецю, близько 1 % хрому, і до 2 % нікелю, а інше – залізо й домішки.

Згідно діючих стандартів, конструкційна легована сталь поділяється на якісну, високоякісну (наприкінці марки буква А) і особливо високоякісну (наприкінці марки через тире ставиться буква Ш, що позначає – електрошлаковий переплав або інші обробки, що поліпшують якість сталі).

Наприклад, 20ХН2 – сталь якісна, 20ХН3А – сталь високоякісна, 30ХГСШ – особливо високоякісна сталь.

Конструкційні сталі поділяються на наступні групи:

Хромиста 15Х, 15ХА, 30ХРА, 38ХА та ін.

Марганцовиста 15Г, 25Г, 10Г2, 35Г2.

Хромомарганцева 18ХГ, 18ХГТ, 20ХГР, 25ХГТ, 35ХГФ.

Хромокремнієва 33ХС, 38ХС і 40ХС.

Хромомолібденова 15ХМ, 20ХМ, 30ХМ, 30Х3МФ.

Хромованадієва 15ХФ і 40ХФА.

2.2. Інструментальні вуглецеві, леговані і швидкорізальні сталі

Інструментальна вуглецева сталь поділяється на якісну і високоякісну.

Якісну сталь виплавляють у мартенівських печах, а високоякісну – в електричних.

Високоякісна сталь відрізняється від якісної меншим вмістом сірки і фосфору і, отже, має вищу міцність і опір ударним навантаженням. Якісні сталі містять не більш 0,03 % сірки і 0,035 % фосфору, а високоякісна не більш 0,02 % сірки і 0,015 % фосфору.

Якісна інструментальна вуглецева сталь має наступні марки: У7. У8. У9 У10, У11, У12, У13. Буква У означає – інструментальна вуглецева сталь, а цифри – вміст вуглецю в десятих частках відсотка. Наприклад, У11 – якісна вуглецева сталь з вмістом вуглецю 1,1 %, інше – залізо, інші елементи і домішки.

Високоякісну інструментальну вуглецеву сталь позначають так само, як якісну, але наприкінці марки ставлять букву А. Наприклад: У7А – високоякісна інструментальна вуглецева сталь з вмістом вуглецю 0,7 %.

Сталь марок У7, У7А, У8, У8А, У8М, У8ГА застосовують для виготовлення інструментів, що піддаються ударним навантаженням: зубил, кернерів, молотків, викруток, пробійників, пуансонів, матриць і т.д. (буква Г означає підвищений вміст марганцю).

Сталь марок У9, У9А, У10, У10А призначена для виготовлення інструментів, що не піддаються сильним поштовхам і ударам, але які потребують високої твердості стругальних різців, калібрів, фасонних штамів, розгорток і т.д.

Зі сталі марок У11, У11А, У12, У12А – роблять особливо тверді інструменти – напилки, шабери, мітчики, фрези і т.д.

Інструментальні леговані сталі (ГОСТ 5950 – 73) по призначенню розділяють на групи і підгрупи:

І) Сталь для ріжучого і вимірювального інструменту:

а) неглибокої прогартовуваності марок 7ХФ, 8ХФ, 3ХФ, 9ХФ, 11Х9, 13ХФ, ХВ4 і В2Ф;

б) глибокої прогартовуваності марок 9Х1, Х, 12Х1, 9ХС, ХГС. 9ХВГ, ХВГ, ХВСГ, 9Х5ВФ, 8Х6НФС.

2) Сталь для штампового інструменту

а) для деформування в холодному стані марок Х6ВФ, Х12, Х12ВМ, Х12М, Х12Ф1, 7ХГ2ВМ і 6Х6В3МФС.

б) для деформування в гарячому стані марок 7Х3, 8Х3, 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНВС, 5Х1М, 4ХМФС і ін.

в) для ударного інструмента марок 4ХС, 6ХС. 4ХВ2С. 5ХВ2С. 6ХВ2С і 6ХВГ.

У позначенні марок одна або дві перші цифри означають середній вміст вуглецю, у десятих частках відсотка. Якщо перед маркою цифри немає – вміст вуглецю приблизно 1 %.

Особливу групу складає високолегована швидкорізальна сталь. За ГОСТ 19265 – 73 вона випускається наступних марок: Р18, Р12, Р9, Р6М3, Р6М5. Р18Ф2, Р14Ф4, Р9Ф5, Р18Д05Ф2, Р100Д05Ф5, Р9Д05, Р6М5Д05, Р9Д010 і Р9М4Д08. У позначенні марки сталі початкова буква Р позначає швидкорізальну сталь (Р – початкова буква слова рапід, що значить швидкий). Цифри, що стоять за нею, показують середній вміст вольфраму, основного легуючого елемента, у відсотках, інші букви і цифри, якщо вони маються – вміст позначених легуючих елементів у відсотках. У позначенні марок сталі не вказується вміст хрому (від 3 до 4,6 %), вуглецю (від 0,7 до 1,1 %) і молібдену (до 1 % включно). Наприклад, Р9Ф5 – швидкорізальна сталь містить 9 % вольфраму і 5 % ванадію, інше – залізо, хром, вуглець і інші домішки.

Сталь марок Р18 і Р12 служить для виготовлення усіх видів інструмента, що ріже, застосовуваного при обробці конструкційних матеріалів; сталь Р6М3 – для виготовлення інструмента невеликих перетинів, що працює з ударними навантаженнями.

2.3. Сталі з особливими властивостями

У даний час випускається велика кількість спеціальних сталей і сплавів, що мають особливі властивості. Це конструкційна сталь підвищеної і високої оброблюваності різанням, високолеговані корозійностійкі, жаростійкі і жароміцні сталі і сплави й ін.

Виплавлювані відповідно до ГОСТ 5632 – 72 спеціальні сталі і сплави в залежності від основних властивостей поділяються на три групи: корозійностійкі (нержавіючі) сталі, наприклад: 08X13, 12X13, 20X13; жаростійкі (окалиностійкі) сталі і сплави, що володіють стійкістю проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах при температурі більш 600°C і працюючі без навантаження або слабонавантаженому стані, наприклад: 15X5, 08X18T1, 15X18ЦЮ, 12X18H12T та ін.; і жароміцні сталі і сплави, здатні працювати у навантаженому стані при температурі нагрівання більш 500 °C і зберігати міцність і стійкість проти хімічного руйнування, наприклад, 40X9C2, 40X10C2M, використовують для виготовлення клапанів двигунів; 08X13, 12X13, 18X12BMБФР, ХН70ВМТЮФ – для виготовлення лопаток турбін; 09X14H16Б, 09X16H15M3Б і ін. – для виготовлення труб пароперегрівників; марок 15X12ВНМФ, ХН77ТЮР – для виготовлення роторів і дисків турбін.

Лабораторна робота № 3

Визначення твердості металевих зразків

Мета роботи: ознайомитись з методами визначення твердості металу; визначити твердість зразків за допомогою різних приладів. Порівняти твердість зразків, підданих різній термічній обробці.

3.1. Теоретичні відомості

Твердістю називають здатність металу чинити опір проникненню в нього іншого, твердішого тіла. Твердість пов'язана відповідними співвідношеннями з міцністю, зносостійкістю, ріжучими властивостями металу і т. ін. Тому складні і такі, що вимагають великого часу дослідження на розтягування, спрацювання і т. ін., замінюють часто на дослідження на твердість, які значно дешевші і можуть бути швидко виконані.

Частіш за все для визначення твердості використовують вдавлення індентора за методами Брінелля, Роквелла і Віккерса.

Дослідження на твердість може виконуватись безпосередньо на деталі без її руйнування. Тому воно широко застосовується не тільки для вивчення властивостей металу, але і як метод контролю якості металу в деталях.

Метод Брінелля. За методом Брінелля (рис. 3.1, а) твердість визначають на спеціальному приладі, вдавлюючи у випробуваний зразок сталюу кульку діаметром 2,5, 5 або 10 мм під навантаженням до 30 кН (3000 кгс). У результаті на поверхні зразка утворюється відбиток у формі сегмента. Число твердості за Брінеллем позначають HB і визначають по діаметру відбитка за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \text{ МПа}$$

де D – діаметр кульки, мм;

P – величина навантаження на кульку, кгс;

d – діаметр відбитка, мм.

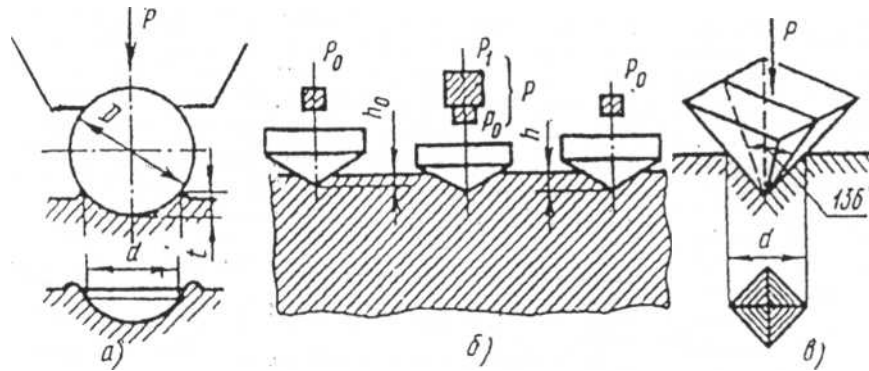


Рис. 3.1. Схема визначення твердості:
а) за Брінеллем; б) за Роквеллом; в) за Віккерсом.

Визначення чисел твердості по Брінеллю можна зробити по таблиці 1 в залежності від діаметра відбитка.

Вибір діаметра кульки вибирається також з довідникової таблиці.

При визначенні твердості за Брінеллем кульки різних діаметрів вибирають, виходячи з умов подібності.

$$\frac{P}{D^2} = \text{const} \rightarrow P = K \cdot D^2,$$

де K – постійна для даного матеріалу величина, що дорівнює 30; 10; 2,5.

Діаметр кульки, зусилля і тривалість навантаження вибирають згідно ГОСТ 9012-59 в залежності від твердості і товщини зразка, як це показано в таблиці 3.1.

Метод Роквелла. За методом Роквелла (рис. 3.1., б) твердість визначають вдавлюванням у випробуваний зразок алмазного конуса з кутом при вершині 120° або сталеву кульку діаметром 1,5 мм. Алмазний конус застосовують для випробування дуже твердих матеріалів, а сталеву кульку – для сплавів кольорових металів або незагартованих сталей.

Число твердості підраховують безпосередньо по шкалі індикатора приладу.

Таблиця 3.1.

Матеріал зразка	Границі вимірювання в одинацях твердості за Брінеллем	Максимальна товщина, мм	Співвідношення між навантаженням і діаметром кульки	Діаметр кульки, мм	Зусилля навантаження Р, кгс	Витримка під навантаженням, сек.
Чорні метали		6-3		10.0	300	
	1400-4500	4-2	P=300	5.0	750	10
		2		2.5	187	
		6		10.0	1000	
	1400	6-3	P=100	5.0	250	10
		3		2.5	62.5	
Кольорові метали		6-3		10.0	3000	
	1300	4-2	P=300	5.0	750	30
		2		2.5	167.5	
		9-3		10.0	3000	
	350-1300	6-3	P=100	5.0	750	30
		3		2.5	167.5	
		6		10.0	3000	
	80-350	6-3	P=25	5.0	750	30
		3		2.5	167.5	

Метод Роквелла застосовується для дослідження матеріалів більш твердих. За цим методом визначення твердості здійснюється вдавленням алмазного конуса (рис. 3.1., б) з кутом при вершині 120° або гартованої сталеві кульки діаметром 1,59 мм. За Роквеллом твердість вимірюється в умовних одиницях і позначається символом HR з доданням назви шкали, яка визначає умови випробування:

HRA – алмазним конусом з зусиллям 600 Н (60 кгс);

HRC – алмазним конусом з зусиллям 1500 Н (150 кгс);

HRB – сталеві кулькою з зусиллям 1000 Н (100 кгс).

Шкали А і С використовуються при випробуванні дуже твердих матеріалів, шкала В – для м'яких металів.

При визначенні твердості за Віккерсом (рис. 3.1., в) в якості вдавленого наконечника використовують чотиригранну піраміду з кутом при вершині 136° (рис. 3.1., в). Твердість за Віккерсом позначається символом HV, наприклад, HV500.

Твердість за Віккерсом визначається так, як і твердість за Брінеллем – відношенням навантаження Р, Н до поверхні отриманого відбитку F, мм²:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2},$$

де α – кут при вершині піраміди;

d – середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитку, мм.

Числа твердості за Віккерсом і Брінеллем для металів твердістю до HB4500 практично співпадають. Можливість застосування на приладі Віккерса малих навантажень (50; 100 Н) дозволяє визначати твердість деталей малої товщини або тонких поверхневих шарів (напр., цементованих, азотованих та ін.).

3.2. Особливості випробування на мікротвердість

Випробування на мікротвердість виконують вдавленням в досліджуваний зразок, як і на приладі Віккерса, чотиригранної алмазної піраміди з кутом при вершині 136°. Відмінною особливістю випробування на мікротвердість є застосування малих навантажень – від 0,05 до 5 Н ($H \sim 1$ кгс); тому цей метод знаходить застосування при дослідженні таких зразків і деталей, які не можуть бути випробувані раніше описаними методами, а саме: дрібних деталей приладів, тонких напівфабрикатів (стрічок, фольги, дроту), гальванічних покриттів, поверхневих шарів, що змінили свої властивості внаслідок обробки різанням, тиску, тертя і т. ін.

3.3. Обладнання і матеріали

Для виконання роботи необхідні:

- прилади Роквелла та Брінелля;
- набір зразків для вимірювання твердості (латунь, дюралюміній, сталь відпалена та гартована, бронза);
- штангенциркуль – для вимірювання товщини зразків;
- лупа – для вимірювання відбитків на зразках.

3.4. Порядок виконання роботи

1. Вибрати зразки з різних матеріалів для вимірювання їх твердості;
2. Підготувати відповідні прилади;
3. Встановити необхідну величину навантаження;
4. Зміряти штангенциркулем товщину зразків;
5. Здійснити вимірювання твердості:

- твердість за Роквеллом визначити за середнім значенням трьох вимірювань;
- твердість за Брінеллем визначити, користуючись формулою 1. і знайти значення, користуючись таблицею 3.2.
- в таблиці 1.5 наведено співвідношення значень твердості за Брінеллем і Роквеллом.

3.5. Зміст звіту з лабораторної роботи

Назва роботи.

Мета роботи.

Опис методів Брінелля і Роквелла.

Вимірювання твердості зразків: результати вимірювання занести до табл. 3.3. і 3.4.

Таблиця 3. 2

Визначення чисел твердості за Брінеллем

Діаметр відбитку, $d_{10}, 2 d_5,$ $4 d_{2,5}, \text{ мм}$	Число твердості HB, при навантаженні Р			Діаметр відбитку, $d_{10}, 2 d_5,$ $4 d_{2,5}, \text{ мм}$	Число твердості HB, при навантаженні Р		
	$300 D^2$	$100 D^2$	$25 D^2$		$300 D^2$	$100 D^2$	$25 D^2$
2,90	4440	-	-	3,40	3210	1070	267
2,95	4290	-	-	3,45	3110	1040	259
3,00	4150	-	346	3,50	3020	1010	252
3,05	4010	-	334	3,55	2930	977	245
3,10	3880	1290	323	3,60	2850	950	237
3,15	3750	1250	313	3,65	2770	923	231
3,20	3630	1210	303	3,70	2690	897	224
3,25	3520	1170	293	3,75	2620	872	218
3,30	3410	1140	284	3,80	2550	849	212
3,35	3310	1100	276	3,85	2480	826	207

Примітки: 1. Інші дані до таблиці брати з довідників

2. Розмірність твердості наведені в МПа. Діаметри відбитків наведені для кульки діаметром 10 мм.

3. При визначенні числа твердості при випробуванні кулькою діаметром 5 мм діаметр відбитка треба помножити на 2, а кулькою 2,5 мм – на 4.

Таблиця 3. 3.

Результати вимірювання твердості на приладі Брінелля

№ №	Матеріал, вид обробки	Навантаження, Р, кгс	Діаметр відбитку			Число твердості, НВ	
			d ₁	d ₂	d ₃	за формулою	за таблицею
1							
2							
3							

Таблиця 3. 4.

Результати вимірювань на приладі Роквелла

№ №	Матеріал, вид обробки	Навантаження, Р, кгс	Шкала	Показники індикатора	
				окремі вимірювання	середнє значення
1					
2					
3					

Таблиця 3. 5

Співвідношення твердості за Роквелла і Брінеллем

Діаметр відбитку, мм	Твердість за Брінеллем, НВ	Твердість за Роквеллом			Діаметр відбитку, мм	Твердість за Брінеллем, НВ	Твердість за Роквеллом		
		HRC	HRB	HRA			HRC	HRB	HRA
2.2	7800	72	-	84	3.3	3630	39	-	70
2.3	7120	68	-	82	3.3	3410	36	-	68
2.4	6530	64	-	80	3.4	3210	33	-	67
2.5	3010	60	-	78	3.5	3020	31	-	66
2.6	5550	56	-	77	3.6	2850	29	-	65
2.7	5140	52	-	75	3.7	2690	27	-	64
2.8	4770	49	-	74	3.8	2550	25	-	63
2.9	4440	46	-	73	3.9	2410	23	102	62
3.0	4150	43	-	72	4.0	2290	20	100	61
3.1	3880	41	-	71	4.1	2117	17	98	60

Примітки: 1. Інші дані до таблиці брати з довідників

2. Діаметр кульки 10 мм.

3. Величина навантаження – 30000 Н.

4. Розмірність твердості в кгс.

Лабораторна робота № 4

Макроскопічний аналіз

Мета роботи: ознайомлення з методикою проведення макроструктурного аналізу; одержання практичних навичок виготовлення макрошліфів, вивчення поверхонь деталей, зламів, макрошліфів, виявлення макродефектів, неоднорідностей, причин руйнування металу; отримання навичок зарисовки макроструктур.

Матеріали та обладнання. Для виконання цієї роботи студентам надаються зразки зламів і макрошліфів, лупи з п'яти та десятиразовим збільшенням, відбитки на фотопапері, що зафіксували ліквацію сірки.

4.1. Теоретичні відомості.

Макроскопічний аналіз (макроаналіз) металів і сплавів полягає в дослідженні їх будови неозброєним оком або за допомогою невеликих збільшень (до 30 разів). Макроаналіз дозволяє оцінити якість матеріалу, виявити наявність у ньому макродефектів, характер його попередньої обробки (лиття, обробка тиском, різання, зварювання, наплавлення, термічна і хіміко-термічна обробка та ін.), структурну і хімічну неоднорідність, волокнистість, причини і характер руйнації. Структура матеріалів, що спостерігається неозброєним оком або при невеликих збільшеннях, називається макроструктурою. Її можна зафіксувати фотознімком або рисунком.

За допомогою макроаналізу можна дати загальну оцінку стану великих поверхонь матеріалу або деталі в цілому і вибрати невеликі найбільш важливі та типові ділянки для подальшого поглибленого вивчення. Макроаналіз проводять шляхом вивчення зламів, макрошліфів або зовнішніх поверхонь заготовок і деталей.

Зовнішні, або поверхневі, макродефекти розташовані безпосередньо на поверхні виробів. Якщо вироби отримані методом лиття, то на їх поверхні найбільш часто зустрічаються такі дефекти:

1) *пригар (burning-in, pickup)*, що у вигляді твердої і важковідокремлюваної кірочки утворюється на поверхні виливка як результат фізичної або хімічної взаємодії металу, формової суміші та шлаку;

2) *усадочні пустоти (pipe defect, contraction cavity)* (раковини, пори), що утворюються в результаті усадки металу (зменшення об'єму) при його твердненні;

3) *газові раковини (бульбашки) (bleb, blowhole)*, які з'являються в металі під час його кристалізації внаслідок як значної газомісткості самого металу, так і проникнення в метал газів, які виділяються з ливарної форми;

4) *ужимини (marring, veining)* – порожнини, заповнені формувальним матеріалом;

5) *тріщини (crack, stress crack)*, що з'являються як результат високих напружень у виливках через опір форми їх усадці (неподатливості форми), а також неоднакових швидкостей охолодження різних частин литої заготовки;

6) *неметалеві включення (nonmetallics)*, що утворюються в результаті взаємодії компонентів сплаву, наприклад заліза, із розчиненими в ньому киснем, сіркою, азотом та внаслідок попадання шлаку і формової суміші при руйнуванні форми.

У пластично деформованих виробах залишається частина дефектів литого металу. Дефекти, що залишилися, при пластичному деформуванні металу видозмінюються. Усадочні пустоти перетворюються в *розшарування*. Деякі неметалеві включення (а також газові бульбашки) з поверхні окислені і тому не заварюються в процесі гарячої обробки тиском, витягуються й утворюють прямі тонкі штрихи-тріщинки глибиною не більше 1,5 мм і довжиною від долей міліметра до декількох сантиметрів. Такі тріщинки, розташовані в напрямку деформування, називаються *волосовинами*. У деяких легованих сталях виявляються *флокени (snow flakes)* – тонкі тріщини, що у поперечному перерізі являють собою овальні плями сріблясто-білого кольору. Вони особливо добре спостерігаються на зламах і протравлених макрошліфах. Походження флокенів пов'язано з поглинанням водню рідкою сталлю, його сегрегацією в місцях великих спотворень кристалічної ґратки затверділої сталі. Це призводить до появи значних напружень і, як наслідок, тріщин при пластичній деформації сталі, а також при її нерівномірному охолодженні або фазових перетвореннях. До дефектів пластично деформованого металу відносять також сильно розгалужені, проникаючі у глиб металу тріщини і раковини, викликані перепалом (тобто окисненням металу по межах зерен); надриви, обумовлені надмірно великим ступенем деформації; окалину – прошарки окисленого металу (якщо вона втиснена в метал, на його поверхні утворюється рябизна).

У термічно обробленому металі часто виявляються знеуглецювання і гартівні тріщини. Знеуглецювання поверхневих шарів сталевих виробів є

результатом окисної дії пічного газового середовища. На поверхні виробів виникають ділянки зі зниженою твердістю – м'які плями. Гартівні тріщини мають зигзагоподібний характер, часто утворюють сітку. Краї гартівних тріщин, на відміну від тріщин гарячедеформованого металу, не знеуглецьовуються, оскільки такі тріщини утворюються в процесі загартування при охолодженні виробів до температур нижче 100 °С або після повного охолодження.

У зварних виробках основними дефектами є тріщини, як результат високих напружень, і непровар. *Непровар (faulty fusion)* – місцева відсутність з'єднання основного металу і наплавленого. Цей дефект виникає при забрудненні поверхонь, що зварюються, або недостатньому розігріві основного металу. Можливий також перепал через високу температуру нагрівання металу в процесі зварювання. Він утворюється при порушенні режиму теплової обробки (висока температура нагрівання в кисневому середовищі), що викликає інтенсивне окислювання металу вздовж границь зерен. Це робить метал крихким. Перепал є дефектом непоправним.

За результатами дослідження поверхонь виробів робиться мотивований висновок про можливість їхньої подальшої експлуатації.

Внутрішні дефекти, що можуть призвести до руйнації виробу, виявляються при вивченні **зламів (breaking)**.

Зламом називається поверхня, що утворюється внаслідок руйнації металу. Злами металів можуть істотно відрізнятися кольором. Так, сталі і білі чавуни, в яких весь вуглець зв'язаний у цементиті, мають злам світло-сірого кольору. У графітізованих сталей і чавунів, у яких вуглець знаходиться переважно у вигляді графіту, злам чорного кольору.

На поверхні зламів можна бачити дефекти, що сприяли руйнації. Залежно від складу, будови металу, наявності дефектів, умов обробки й експлуатації виробів злами можуть мати в'язкий чи крихкий характер або утворитися від втоми.

В'язкий (волокнистий) злам (рис. 4.1, а) має бугристо-згладжений рельєф і свідчить про значну пластичну деформацію, що передуює руйнації. З вигляду в'язкого зламу не можна судити про форму і розміри зерен металу.

Крихкий (кристалічний) злам (рис. 4.1, б) характеризується наявністю на поверхні плоских блискучих ділянок (фасеток). Оскільки руйнація протікає без помітної пластичної деформації і форма зерна не спотворюється, то на крихкому зламі видно вихідні форми і розмір зерен металу. При цьому руйнація може відбуватися через зерна (транскристалічний злам) або по границях зерен (інтеркристалічний, або міжкристалічний, злам). Руйнація по

границях зерен має місце при наявності на них неметалевих включень (фосфіди, сульфід, оксиди тощо) або інших виділень, що послаблюють міцність меж зерна.

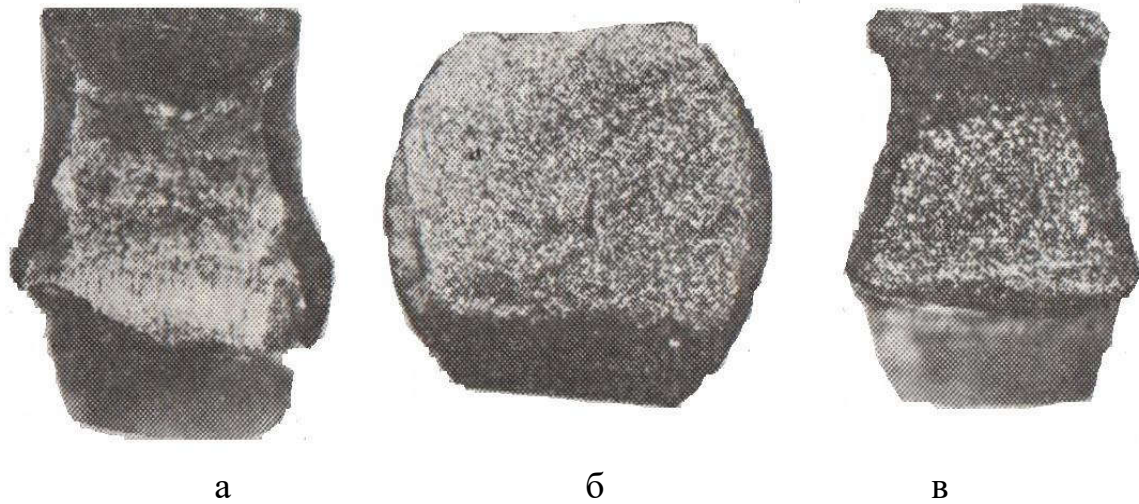


Рис. 4. 1. Злами сталі: а – в'язкий; б – крихкий; в – змішаний

Крихка руйнація найбільш небезпечна, тому що відбувається найчастіше при напруженнях нижче межі текучості матеріалу. Її виникненню сприяють наявність поверхневих дефектів, конструктивні прорахунки (різка зміна перерізу, товстостінність деталей), низька температура й ударні навантаження при роботі, крупнозернистість металу, виділення по границях зерен крихких фаз, міжзеренна корозія. Різновидами крихкого зламу є нафталіноподібний, каменеподібний, фарфороподібний та ін.

Нафталіноподібний злам – транскристалічний із значним зерном і вибіркоvim блиском, подібним блиску кристалів нафталіну. Він свідчить про підвищену крихкість сталі і спостерігається в легованих, переважно швидкорізальних сталях. Причиною виникнення такого зламу є перегрів сталі, що викликає укрупнення зерен і утворення певної орієнтації структурних складових (текстура). Зовнішньо в зламi текстура виявляється як одне велике зерно. Нафталіноподібний злам усувається шляхом багаторазових повторних фазових перекристалізацій металу.

Крихкий злам називають *каменеподібним*, якщо метал має грубозернисту будову, а руйнація носить переважно міжкристалістичний характер. Причина утворення такого зламу – перерозподіл домішок при перегріві металу з виділенням їх у приграничних ділянках зерен. Каменеподібний злам можна усунути шляхом гомогенізувального відпалу.

Зазвичай злами бувають змішаними. При змішаному зламі (рис. 4.1, в) на його поверхні спостерігаються ділянки в'язкої та крихкої руйнації.

Фарфороподібний злам характерний для правильно загартованої сталі, вигляд зламу матовий, дрібнозернистий.

Від утоми злам (рис. 4.2) утвориться в результаті тривалого впливу на метал напружень, які циклічно змінюються в часі, і деформацій. Злам складається з трьох зон: зародження тріщини, поширення тріщини від утоми і доламу. Механізм руйнації від утоми такий. Тріщина при руйнації від утоми виникає в місцях, де є концентратори напружень або дефекти. Перша зона плоска і гладенька. Збільшуючись при роботі деталі, тріщина утворює зону поширення від утоми з характерними концентричними борозенками або дугами і дрібнозернистим, фарфороподібним зломом. Найчастіше вона має окремі ділянки гладенької притертої поверхні. Долам відбувається раптово, коли ослаблений тріщиною перетин деталі не здатний витримати механічного навантаження. Долам буває в'язким або крихким.

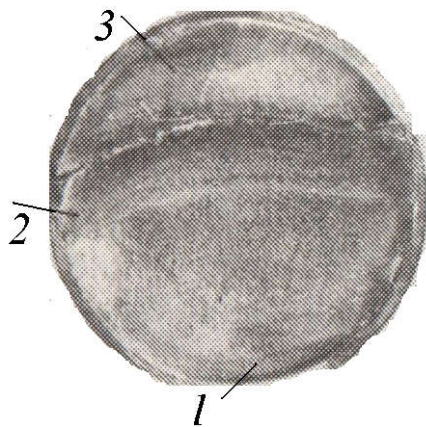


Рис. 4. 2. Злам штока компресора від утоми:

1 – зона зародження тріщини; 2 – зона поширення тріщини; 3 – зона доламу

У практиці широко використовують такий метод макроаналізу як дослідження макрошліфів. Макрошліф – це зразок із плоскою шліфованою і протравленою поверхнею, вирізаний із досліджуваної ділянки деталі або заготовки. Його одержують таким способом. На металорізальному верстаті або ножівкою вирізують зразок, одну з плоских поверхонь якого вирівнюють напилком або на плоскошліфувальному верстаті. Потім зразок шліфують вручну або на шліфувально-полірувальному верстаті шліфувальною шкуркою різної зернистості. Шліфування шкуркою проводять в одному напрямку, після чого потрібно змити залишки абразиву водою. Переходячи

на дрібнішу шкурку, повертають зразок на 90° і проводять обробку до повного зникнення рисок, утворених попередньою шкуркою. Зразок промивають водою, просушують і піддають глибокому або поверхневому травленню. Перед травленням зразок знежирюють і очищають, як правило, етиловим спиртом.

Деякі реактиви, що використовуються для глибокого травлення макрошліфів, наведені в таблиці 4.1.

Реактив активно взаємодіє з тими ділянками, де є дефекти і неметалічні включення, протравлює їх більш сильно і глибоко. Поверхня макрошліфа утворюється рельєфною. За допомогою реактивів для глибокого травлення виявляються навіть внутрішні дефекти (пори, раковини, ліквіація, волосовини, тріщини, флокени та ін.), що не виходять безпосередньо на поверхню деталі. Поверхнєве травлення, проведене менш агресивними реактивами, дозволяє виявити в сталях, чавунах і кольорових сплавах ліквіацію, макроструктуру литого або деформованого металу, дефекти, якість зварних з'єднань, структурну неоднорідність матеріалу, підданого термічній або хіміко-термічній обробці.

Протравлений макрошліф промивають водою для видалення протравлювача, обробляють спиртом, висушують із метою запобігання корозії.

Таблиця 4.1

Реактиви, що застосовують для травлення макрошліфів, і особливості травлення

Сплави	Реактив, його призначення та склад		Особливості травлення
Вуглецеві та низьколеговані сталі, чавуни	Виявлення ліквіації, дефектів, дендритності, неоднорідності, волокнистості	10...20 мл сірчаної кислоти, 90...80 мл води	Температура - 20 або 70°C , тривалість — декілька годин
Високолеговані і корозійностійкі сталі	Виявлення загальної макроструктури, дефектів, ліквіації, волокнистості, дендритності	10 мл сірчаної кислоти, 50 мл соляної кислоти, 40 мл води	Киплячий розчин, тривалість — 10...60 хв.

Макроаналіз макрошліфів дозволяє виявити *структурну* (наприклад, у сталі, загартованої струмами високої частоти) або *хімічну* (наприклад, у сталі, науглецьованій або в наплавленій зносо- і корозійностійким сплавом)

неоднорідність, що виникла при обробці готових виробів. Хімічна неоднорідність сплаву, що виникає при його виробництві, називається *ліквацією* (*liquation, segregation, sweat*). Особливо схильні до ліквації в сталі вуглець, сірка і фосфор.

Важливо знати розподіл у сталі шкідливих домішок сірки і фосфору, що створюють істотний вплив на структуру металу і його властивості. Сірка викликає червоноламкість сталі, тобто крихкість при високих температурах, а фосфор – холодноламкість, тобто крихкість при низьких температурах. Тому вміст сірки і фосфору в сталях строго регламентується. Характер розподілу названих елементів залежить від процесу кристалізації металу у виливку або у зварному з'єднанні і від виду обробки тиском.

Загальну ліквацію вуглецю, фосфору і сірки дозволяє оцінити обробка макрошліфу реактивом Гейна (8 г хлористого аміакату міді на 100 мл води). При взаємодії шліфа і реактиву, залізо з поверхневого шару сталі переходить у реактив, на його місце осаджується мідь, що захищає сталь від подальшого впливу реактиву.

Місця скупчень вуглецю, сірки і фосфору менше захищені міддю і протравлюються сильніше. Після видалення під струменем води шару міді, ці ділянки виглядають темніше (рис. 4.3.).

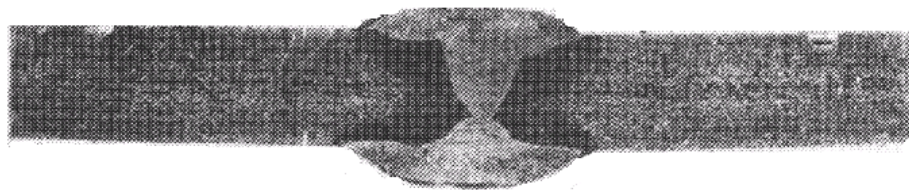


Рис. 4. 3. Хімічна неоднорідність зварного з'єднання

Ліквацію сірки в сталі або чавуні можна оцінити за методом Баумана (реактив - 5 мл сірчаної кислоти, 100 мл води). Нефіксований фотопапір змочують реактивом, притискають емульсією до макрошліфа на 1...10 хв, промивають, фіксують, знову промивають і висушують.

Сірка знаходиться в сталі в складі сульфідів (Fe і Mn). При взаємодії їх із сірчаною кислотою, що залишилася на фотопапері, утворюється сірководень ($\text{FeS} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{S}\uparrow$). Сірководень взаємодіє з бромистим сріблом фотоемульсії ($2\text{AgBr} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{HBr} + \text{Ag}_2\text{S}$). Темні ділянки, що утворюються Ag_2S , виявляють форму і характер розподілу сірки в досліджуваному металі. На рис. 4.4 показано макрознімок (відбиток,

зроблений за методом Баумана), на якому чітко видно ліквацію сірки по перерізу рейки.

З ліквацією хімічних елементів також тісно пов'язані *дендритність* структури литих сплавів і *волокнистість* структури деформованих металів. Дендритами називають кристали (зерна) литого металу, що мають деревоподібну форму. Шкідливі домішки у вигляді неметалевих включень (сульфідів, фосфідів, оксидів) і деякі легувальні елементи накопичуються частіше всього в міждендритних просторах.



Рис. 4. 4. Ліквація сірки в сталі

Продукцією металургійних підприємств, як правило, є метал, що перетерпів гарячу обробку тиском – кування або прокатування. При деформуванні дендрити, спочатку дезорієнтовані, поступово витягуються вздовж напрямку деформації. Витягуються і неметалеві включення. У результаті цього формується типова для прокатуваного металу стрічкова, волокниста структура. Таку волокнисту будову металу називають *первинною стрічковістю*. Повторна стрічковість утворюється в доєвтектоїдній сталі (та в деяких легованих при їх охолодженні від високих температур) у результаті виділення надлишкового фериту з аустеніту на витягнутих неметалевих включеннях. Макроаналіз дозволяє встановити і спосіб виготовлення деталей – обробка тиском (рис. 1.5, а) або різанням (рис. 4.5, б).

Волокниста будова металу обумовлює різко виражену анізотропію його властивостей (розходження їх показників вздовж і поперек волокна).

Пластичність, ударна в'язкість і міцність зразків, вирізаних вздовж волокон, вище. Тому відповідальні деталі, особливо які працюють при високих динамічних навантаженнях (колінчасті вали, шестерні, шатуни, молотові штампи, клапани, гаки тощо), виготовляють так, щоб волокна в них

не перерізалися, а відповідали конфігурації виробу. При обробці різанням деталі з деформованої сталі її волокна перерізаються, що різко зменшує міцність деталі.

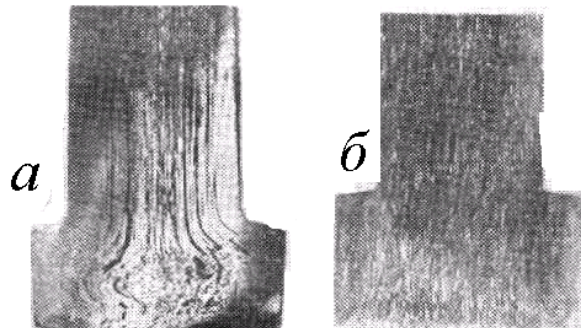


Рис. 4. 5. – Макроструктура болтів, виготовлених:
а – штампуванням; б – різанням

4.2. Завдання на роботу

1. Ознайомитися з методикою приготування макрошліфів.
2. Вивчити колекцію зразків з основними дефектами, що спостерігаються на їх поверхні. Замалювати ці дефекти.
3. Дослідити і замалювати макроструктуру макрошліфів із хімічною неоднорідністю (зварні з'єднання, деталі, зміцнені термічною, хіміко-термічною обробкою або наплавленням), деталей, виготовлених різанням і обробкою тиском.
4. Оцінити ліквацію на макрошліфі згідно з методом Баумана.
5. Вивчити і замалювати основні види зламів (в'язкий, крихкий, від втоми).
6. Зробити висновки і скласти звіт по роботі відповідно до завдань (у звіті обов'язково повинні бути зазначені тема, мета роботи, пояснення до кожної розглянутої макроструктури).

4.3. Контрольні питання для самопідготовки

1. Які дослідження дозволяє виконувати макроструктурний аналіз металів і сплавів?
2. Яким методом досліджується ліквація сірки в металі?
3. Що можна дослідити методом зламів зразків металів і сплавів?
4. Як досліджується волокниста макроструктура металів?
5. Що досліджується методом Баумана?
6. Яким спостерігається злам металу від втоми?

Лабораторна робота № 5

Мікроскопічний аналіз

Мета роботи: освоїти технологію приготування мікрошліфів, вивчити будову металографічного мікроскопа і навчитись на ньому працювати, вивчити мікроструктуру сплаву до та після травлення і навчитись зарисовувати найпростіші мікроструктури.

Матеріали та обладнання. Для проведення даної лабораторної роботи студентам надаються зразки сплавів, набір шліфувального паперу, верстат для полірування зразків, паста ГОІ, реактив для протравлювання шліфів, спирт, фільтрувальний папір, металографічний мікроскоп, набір об'єктивів і окулярів.

5.1. Теоретичні відомості

Мікроскопічний аналіз (мікроаналіз) металів і сплавів полягає в дослідженні будови (мікроструктури) металу за допомогою оптичного (при збільшенні від 50 до 1500 разів) або електронного (при збільшенні до 100000 разів) мікроскопа. Між мікроструктурою металів та їх властивостями існує чіткий зв'язок. Мікроаналіз дозволяє визначити форму і розміри окремих зерен і фаз, а також їх вміст, відносне розташування, виявити наявність у металі включень, мікрodefektів і судити про властивості металів і сплавів, про попередню обробку цих матеріалів (лиття, деформування, термічна обробка). Мікроаналізу піддають спеціально підготовлені зразки, які називають *мікрошліфами*.

Мікрошліфи готують у такий спосіб. Місце вирізання зразка вибирають залежно від задач дослідження (у ряді випадків порядок і місце вирізання строго регламентуються Держстандартами). У випадку з'ясування причин руйнації деталей під час експлуатації зразки вирізають поблизу місця руйнації ножівкою, фрезою, різцем, алмазними, вулканітовими кругами або електроіскровим методом. При вирізанні і наступному шліфуванні зразка неприпустиме значне нагрівання (вище 150 °C), тому що воно може викликати суттєві структурні зміни металу.

Зазвичай зразки мають форму циліндра або чотиригранника з лінійними розмірами 10...20 мм. У випадку, коли розміри мікрошліфів малі (дріт, тонкий лист, дрібні деталі), останні закріплюють у спеціальних затискачах

(струбцинах) або заливають в оправки такими матеріалами як сплав Вуда (50 % Bi, 25 % Pb, 12,5 % Sn, 12,5 % Cd) з температурою плавлення 68 °С, епоксидні або акрилові смоли, пластмаси.

Поверхню зразка роблять плоскою і **шліфують** вручну або на верстатах наждачним папером різної зернистості (різних номерів): спочатку, для чорнового шліфування, беруть більш грубий папір (номери 12 ... 6), а потім, для чистового, заключного шліфування – папір номерів 5 ... 3 (номер визначає приблизний розмір абразивних зерен в сотих частках міліметра). Якщо шліфування ведуть вручну, шліфувальний папір кладуть на рівну плоску поверхню (наприклад, на товсте скло) і зразок переміщують по ньому в одному напрямі, перпендикулярному до слідів (рисок), що залишилися після попередньої обробки до повного зникнення цих слідів. Після шліфування залишки абразиву змивають водою з поверхні шліфа. Потім для видалення дрібних рисок, що залишилися після шліфування найдрібнішою шкуркою, зразок **полірують**.

Існуючі способи полірування засновані на механічному або електрохімічному способі видалення матеріалу, або ж на їх комбінації. Механічне полірування ведуть на полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий тканиною (фетр, оксамит, тонке сукно). Тканину періодично поливають водною суспензією, що містить дрібні абразивні частки оксидів алюмінію, хрому або заліза. Добрим полірувальним матеріалом є алмазні пасти, паста ГОІ. Коли поверхня набуває дзеркального блиску, полірування припиняють. На якісно відполірованому мікрошліфі при спостереженні під мікроскопом відсутні риси, подряпини та інші механічні дефекти.

Мікрошліф промивають водою, потім спиртом, просушують стиснутим повітрям або фільтрувальним папером. Після полірування під мікроскопом спочатку вивчають нетравлений шліф, потім – протравлений.

При вивченні нетравленого шліфа можна виявити різноманітні мікроефекти, наприклад мікротріщини, та неметалеві включення (оксиди, сульфід, графіт – рис. 5. 1) в металевій основі, яка має світлий колір при спостереженні під мікроскопом. Після перегляду нетравленого мікрошліфа його піддають травленню, щоб виявити мікроструктуру металевої основи шліфа. Для сталі та чавуну найчастіше застосовують 2...5%-овий розчин азотної кислоти в етиловому спирті. Поліровану поверхню шліфа занурюють у реактив на 3 ... 10 с до утворення рівного матового відтінку без наявності будь-яких плям. Потім шліф промивають водою, спиртом і просушують фільтрувальним папером.

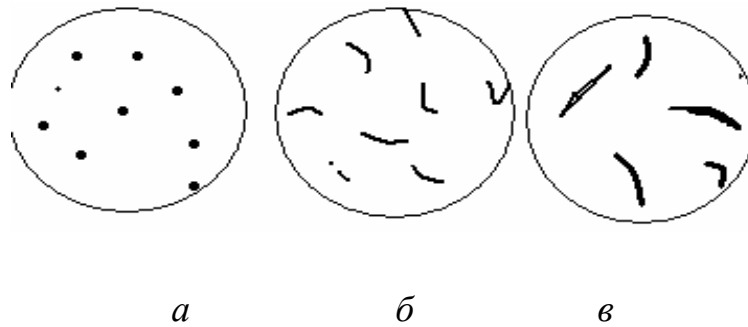


Рис. 5. 1. Неметалеві включення в сталі та чавуні:
а – оксиди; б – сульфіди; в – графіт

Внаслідок неоднакової протравлюваності різних структурних складових на поверхні мікрошліфа утворюється мікрорельєф, складові якого по – різному відбивають світло, що падає на поверхню шліфа через оптичну систему мікроскопа. Структура, що розчинилась на більшу глибину, під мікроскопом має темний колір, а структура, яка розчинилась менше, має світлий колір (рис. 5.2, а, в). Границі зерен будуть видні у вигляді тонкої темної сітки (рис. 5.2, б, г).

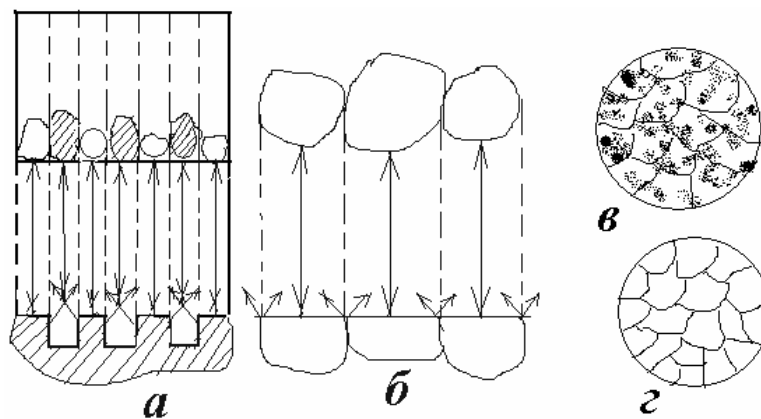


Рис. 5.2. Схеми, які пояснюють видимість протравлених шліфів під мікроскопом: а, в – зерна у впадинах – темного кольору, виступаючі – світлого; б, г – границі зерен металів і твердих розчинів.

Будова металу, що спостерігається під мікроскопом, називається **мікроструктурою** (*microstructure*), яка є зображенням досить малої ділянки поверхні, складена з відбитих від неї світлових променів.

Загальний вигляд металографічного мікроскопа МИМ-7 показано на рис. 5.3. Він складається з таких основних систем: оптичної, освітлювальної з фотографічною апаратурою і механічної.

Оптична система мікроскопа включає об'єктив і окуляр, від яких залежить збільшення мікроскопа, і ряд допоміжних елементів (призми, дзеркала, лінзи й ін.). Об'єктив, що є складним сполученням лінз, дає дійсне збільшене обернене зображення мікроструктури мікрошліфа. Окуляр складається з декількох лінз і призначений для збільшення зображення, отриманого об'єктивом, і перетворення його з оберненого в пряме. Збільшення мікроскопа визначається добутком збільшення окуляра на збільшення об'єктива.

В освітлювальну систему мікроскопа входять джерело світла, серія лінз, світлофільтрів і діафрагм. Джерелом світла є електрична лампа (17 В), що включається в мережу через понижувальний трансформатор.

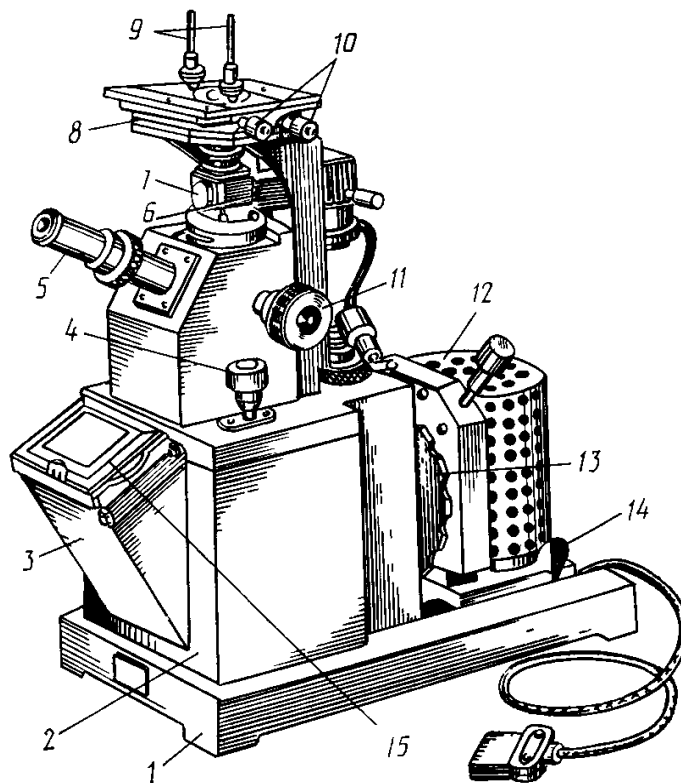


Рис. 5. 3. Загальний вигляд мікроскопу МИМ – 7:

1 – основа, 2 – корпус, 3 – фотокамера, 4 – мікрометричний гвинт, 5 – візуальний тубус з окуляром, 6 – ручка ілюмінатора, 7 – ілюмінатор, 8 – предметний столик, 9 – клеми, 10 – гвинти переміщення столика, 11 – макрометричний гвинт, 12 – освітлювач, 13 – ручка світлофільтрів, 14 – стопорний пристрій освітлювача, 15 – рамка з матовим склом.

Вивчення протравленого шліфа дозволяє вирішувати ряд задач при аналізі мікроструктурної будови металу або сплаву: встановлювати кількість структурних складових сплаву та характер їх розташування; величину зерен

(шляхом їх зіставлення зі спеціально встановленою шкалою або безпосереднім вимірюванням, знаючи величину збільшення); вид термічної обробки і правильність вибору її режиму (температури нагрівання, швидкості охолодження); приблизний вміст деяких елементів, наприклад, вуглецю у відпалених сталях.

Між структурою та властивостями металів і сплавів існує пряма залежність. Тому в практиці металознавства мікроаналіз є одним з основних методів, які дозволяють вивчати будову металів і сплавів, а, отже, отримувати дані про їх властивості.

5.2. Завдання на роботу

1. Вивчити будову металографічного мікроскопа і засвоїти прийоми роботи на ньому.
2. Приготувати мікрошліф (наприклад, сірого чавуна або сталі), вивчити і зарисувати його структуру до і після травлення.
3. Зробити висновки і скласти звіт по роботі відповідно до вищевказаних пунктів завдань.

5.3. Зміст звіту

У звіт потрібно включити:

- технологію приготування мікрошліфів,
- реактив, який застосовується для травлення чавуну та сталі,
- схеми мікроструктур і їх описання.
- У висновках вказати:
 - на особливості будови досліджуваного металу до і після травлення,
 - наявність неметалевих включень, дефектів і їх вплив на властивості металу.

5.4. Контрольні питання для самопідготовки

1. З якою метою проводиться мікроструктурний аналіз металів і сплавів?
2. Технологія виготовлення мікрошліфів.
3. З якою метою мікрошліфи протравлюють?
4. Які реактиви застосовуються для протравлення шліфів?

Лабораторна робота № 4

Мікроаналіз залізовуглецевих сплавів (сталей) в рівноважному стані і після гартування

Мета роботи: Вивчити мікроструктури технічного заліза, вуглецевих сталей (доевтектоїдної, евтектоїдної і заевтектоїдної) в рівноважному стані і після загартування. Установити зв'язок між структурами і діаграмою стану залізо-цементит.

6.1. Загальні відомості

Важливою властивістю залізовуглецевих сплавів є те, що вони в залежності від вмісту вуглецю, температури нагрівання, швидкості охолодження здатні мати різні структури. Змінюючи структуру, можна одержати різні фізико-механічні властивості сплавів. Здатність сплавів утворювати різні структури заснована на тім, що твердий розчин вуглецю в γ -залізі, названий аустенітом, метастабільний, здатний існувати переважно при високих температурах. При охолодженні аустеніт розпадається в залежності від швидкості охолодження і перетворюється в інші структури. При повільному охолодженні в результаті розпаду аустеніту утворюється ферит і цементит, евтектоїдна суміш яких називається перлітом. При особливих умовах, наприклад при високому вмісті кремнію, утвориться вільний графіт (вуглець відпалу).

Аустеніт – твердий розчин вуглецю в γ - залізі з гранецентрованою решіткою. Аустеніт має велику в'язкість, гарний опір стиранню, хімічну стійкість, твердість 170 – 220 НВ.

Ферит – твердий розчин вуглецю в α - залізі. Він має об'ємноцентровану кубічну решітку. Його твердість - 80 НВ. Пластичність залежить від величини зерна: чим дрібніше зерна, тим пластичність вища.

Цементит – карбід заліза Fe_3C , що містить 6,67% С. Він має орторомбічну решітку, його твердість дуже висока - 800 НВ. Одночасно ця фаза являється дуже крихкою. Температура плавлення цементиту близько 1250°C.

Перліт – евтектоїдна суміш фериту і цементиту. Вона утворюється при розпадові твердого розчину аустеніту з концентрацією 0,8%С після охолодження нижче 727°C. Цементит у перліті може знаходитися у вигляді пластинок і дрібних зерен, його механічні властивості залежать від ступеня здрібнювання і форми. Твердість перліту 160-200 НВ.

Ледебурит – евтектична суміш, що складається в момент утворення з цементиту й аустеніту, гранично насиченого вуглецем до концентрації 2,14%. Аустеніт при 727°C перетворюється в перліт. Твердість ледебуриту 700 НВ. Ледебурит характерний для структури білих чавунів.

Мікроструктура технічного заліза й вуглецевих сталей для рівноважних

умов характеризується лівою частиною діаграми залізо-вуглець (рис. 6.1).

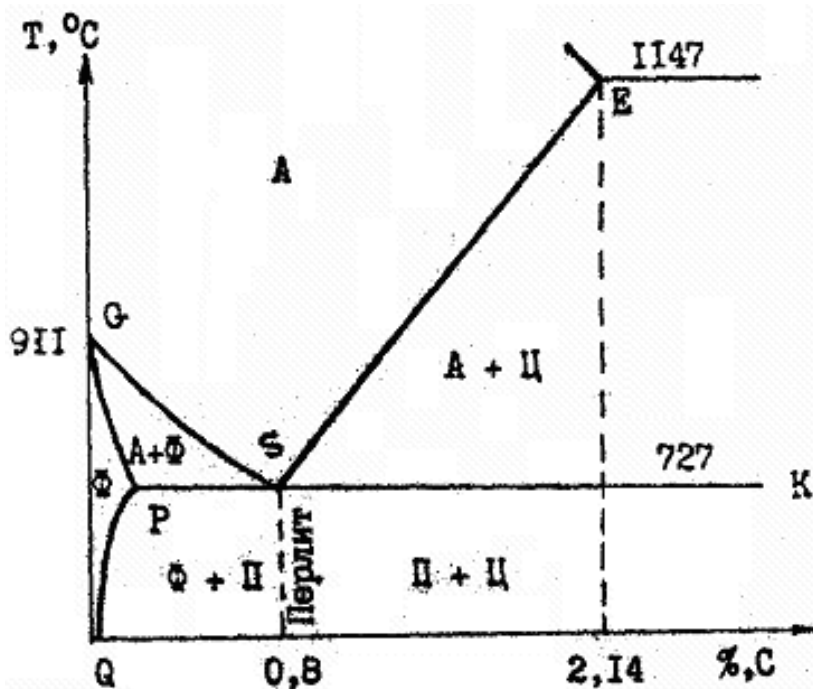


Рис. 6.1. Нижня ліва частина діаграми стану «залізо-вуглець».

Сплави з вмістом вуглецю до 0,02%С (точка Р) називаються технічним залізом, від 0,02% до 0,8%С - доєвтектоїдними сталями і від 0,8 до 2,14 % С – заєвтектоїдними. Сплав з вмістом 0,8% (точка S) називається евтектоїдною сталлю.

Розчинність вуглецю в α -залізі (фериті) перемінна (див. лінію PQ на рис. 6.1). Зі зниженням температури розчинність вуглецю в α -залізі знижується. При 727°C в залізі розчиняється 0,02 % С, а при кімнатній температурі 0,006%С (точка Q). У зв'язку з цим сплави заліза з вмістом до 0,006 % С мають структуру фериту, що представляє собою твердий розчин вуглецю α -залізі (див. рис. 6.2, а).

Мікроструктура доєвтектоїдної сталі (до 0,8 % С) складається з структурно-вільного фериту і перліту. У доєвтектоїдної сталі після травлення ферит має вигляд світлих рівновісних зерен, а перліт – темних. При великому збільшенні чітко виявляються пластинки фериту та цементиту.

Кількість перліту в доєвтектоїдній сталі залежить від вмісту вуглецю. Зі збільшенням вмісту вуглецю кількість перліту збільшується (рис. 6.2, б).

По мікроструктурі доєвтектоїдної сталі можна визначити вміст у ній вуглецю, для чого потрібно орієнтовно визначити площу (у відсотках), займану феритом і перлітом.

У зв'язку з тим, що у фериті розчинено дуже невелика кількість вуглецю, практично можна вважати, що в доєвтектоїдній сталі весь вуглець знаходиться в перліті.

Тоді вміст вуглецю в сталі можна визначити по формулі:

$$C = \frac{Fn \cdot 0.8}{100} \% ,$$

де F_n – площа, займана перлітом, %.

Припустимо, наприклад, що 30% усієї площі зайнято феритом, 70% перлітом. Вміст вуглецю в такій сталі буде:

$$C = \frac{70 \cdot 0.8}{100} = 0,56\%$$

Мікроструктура евтектоїдної сталі (0,8%С) складається з одного перліту. При травленні шліфа сталі з 0,8%С поверхня має перламутровий відлив, у зв'язку з чим таку структуру назвали перлітом (рис. 6.2, в).

6.2. Мікроструктура заевтектоїдної сталі

Сталь із вмістом вуглецю від 0,8 до 2,14% називається заевтектоїдною і має структуру, що складається з перліту і вторинного цементиту (рис.6.2, г). Вторинний цементит виділяється з аустеніту при охолодженні від температури A_{cm} (лінія SE) до температури A_{r1} (лінія PSK) (див. рис.6.1).

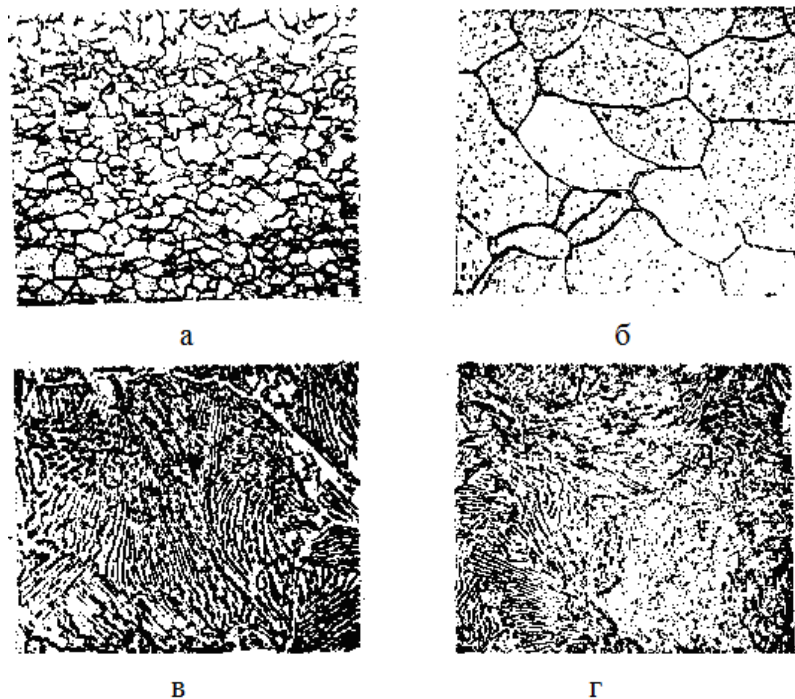


Рис. 6.2. Мікроструктура сталі в рівноваженому стані:
а – фериту; б – доевтектоїдної сталі з 0,08 % С; в – евтектоїдної сталі з 0,8 % С; г – заевтектоїдної сталі з 1,0 % С.

При повільному охолодженні вторинний цементит виділяється у вигляді сітки по границях зерен аустеніту. При досягненні температури A_{r1} аустеніт перетворюється в перліт. В результаті повільного охолодження заевтектоїдна сталь має структуру перліту і сітку цементиту по границях колишніх аустенітних зерен (див. рис. 6.2, г).

Чим більше вуглецю в заевтектоїдній сталі, тим більше масивною

(товстою) виходить цементитна сітка, яка представлена у вигляді світлих полів, а перліт у вигляді темних стрічок пластинчастої форми.

Вміст вуглецю в заевтектоїдній сталі можна визначити за формулою:

$$C = \frac{F_n \cdot 0.8}{100} + \frac{F_{\psi} \cdot 6.67}{100},$$

де F_{ψ} - площа шліфа, займана цементитом.

Зі збільшенням швидкості охолодження аустеніту збільшується дисперсність (Ф+Ц) - суміші і зростає твердість. Структури мають назви перліт – сорбіт – троостит – бейніт (рис.4.2, б,в).

При максимальній швидкості охолодження (загартуванню) відбувається бездифузійне перетворення ГЦК в ОЦК і утвориться голчаста структура – мартенсит (див. рис.4.3, г).

Мартенсит являє собою пересичений твердий розчин вуглецю в α - залізі.

Вміст вуглецю в мартенситі майже такий же, як у вихідному аустеніті.

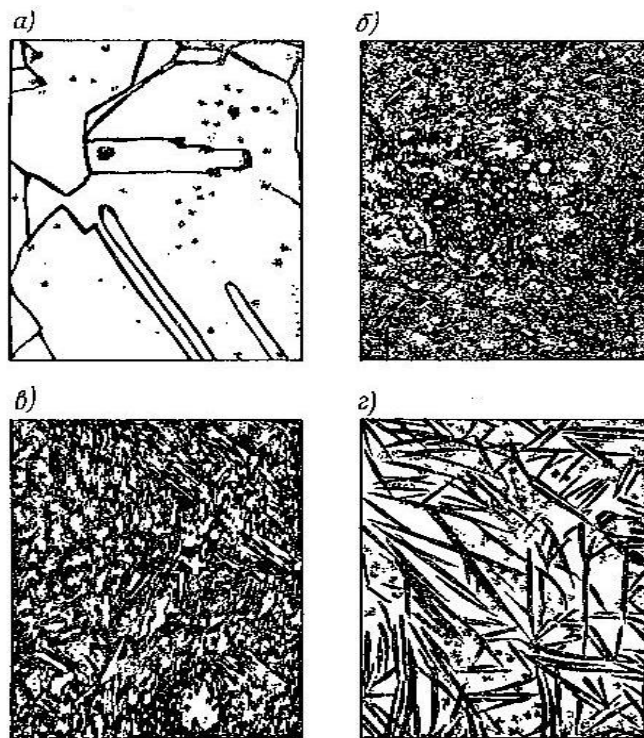


Рис.6.3. Мікроструктура сталі, яка утворюється при різних ступенях охолодження: а)початковий аустеніт; б) сорбіт; в) троостит; г)голчастий мартенсит.

Мартенсит має високу твердість. Твердість мартенситу тим вища, чим більше в ньому вуглецю. Твердість мартенситу з 1,8 % С – 64 HRC.

Аустеніт перетворюється в мартенсит у тому випадку, коли дифузійні процеси цілком придушуються, тобто стають неможливими. Мартенситне перетворення носить бездифузійний характер, тобто воно не супроводжується перерозподілом вуглецю, а відбувається за рахунок

перебудови ГЦК решітки аустеніту в ОЦК решітку α -заліза, без виділення з розчину вуглецю, що і приводить до перетворення кубічної решітки в тетрагональну.

У структурі сплавів на основі заліза виявлено два типи мартенситу: рейковий (пакетний) і двійникований (пластинчастий).

Рейковий мартенсит характерний для низковуглецевих сталей (до 0,4 % С), пластинчастий - для високовуглецевих сталей.

По своїй природі мартенсит має дуже дрібне зерно і тому вивчати його під оптичним мікроскопом складно. У цих випадках застосовують більш складну і сучасну техніку – електронний мікроскоп, що дозволяє вивчати структуру сталі зі збільшеннями від декількох тисяч до сотень тисяч разів.

Структури низковуглецевої загартованої сталі приведені на рис. 6.3.

При великих збільшеннях в електронному мікроскопі можна вивчати тонку структуру мартенситу: розподіл і щільність дислокацій, морфологію мартенситу, карбідні виділення і т.д.

6.3. Прилади матеріали й інструменти

Для проведення роботи необхідні: металографічний мікроскоп, набір шліфів заліза й вуглецевих сталей (з різним вмістом вуглецю) у рівноважному стані і після загартування, циркуль і лінійку.

6.4. Порядок виконання роботи

1. Вивчити структури вуглецевих сталей за методичкою.
2. Розглянути за допомогою оптичного мікроскопу, замалювати й описати мікроструктури сталей, визначити по мікроструктурі вміст вуглецю в доевтектоїдній сталі.
3. Накреслити діаграму залізо-цементит, указати на ній положення досліджених сталей, визначити їхні критичні точки.
4. Скласти протокол мікроаналізу сталі.

6.5. Склад звіту

У звіті повинно бути:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета роботи.
3. Рисунки мікроструктур з поясненнями.
4. Діаграма стану залізо-цементит із вказаними на ній досліджуваними сталями і критичними точками.
5. Розрахунки по визначенню процентного вмісту вуглецю в досліджуваних сплавах і кількісному співвідношенні фазових складових.
6. Відповіді на контрольні запитання.

Зразок змальованої мікроструктури представлено на рис. 6.4.

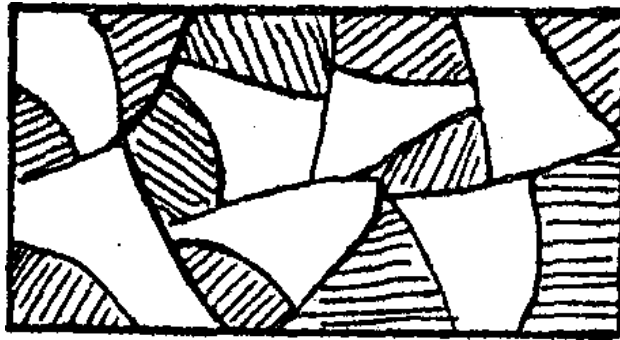


Рис. 6.4. Надлишковий ферит і перліт. Травлення 3%-вим розчином HNO_3 .

Зразковий опис структури

Доевтектоїдна сталь фази ферит і цементит. Структурні складові: світла сітка надлишкового фериту і перліту пластинчастої структури.

$$\Phi = 25\% \quad \Pi = 75\% \quad C_{\text{общ.}} = \frac{0.83 \cdot 75}{100} = 0,6 \%$$

Таблиця 6.1

Протокол мікроаналізу сталей

№	Найменування і марки сталі	Вміст вуглецю, %	Мікроструктура	
			Замальовка	Найменування
1		доевтектоїдна		
2		евтектоїдна		
3		заевтектоїдна		
4		після загартування		

Контрольні запитання

1. Що таке ферит, перліт, аустеніт, цементит і мартенсит?
2. Які структури технічного заліза і сталі?
3. Як класифікуються сталі за структурою і вмістом вуглецю.
4. Як змінюється структура сталі зі збільшенням вмісту вуглецю?
5. Які характерні особливості структури мартенситу?

Список рекомендованої літератури

1. Сологуб М.А., Рожнецький І.О. та ін. Технології конструкційних матеріалів. – К.: Вища школа. – 1993. – 218 с.
2. Большаков В.І., Харченко В.І., Вашкевич Ф.Ф. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. – К.: Вища школа, 1986. – 180 с.
3. Плєскач В.М., Волчок І.П., Аверченко П.О. Технологія конструкційних матеріалів. Термінологічний словник. – К. НМК Вищої освіти, 1992.