

## ТЕМА 4 Компоненти залізо-вуглецевих сплавів

### 4.1 Основні компоненти сплавів

Залізовуглецеві сплави (сталі та чавуни) – це найважливіші металеві сплави сучасної техніки. За обсягом виробництва сталі та чавуну перевищує виробництво кольорових металів і сплавів понад 10 разів. Тому вивчення діаграми стану залізо-вуглець, яка дає основне уявлення про будову залізовуглецевих сплавів, дуже важливо.

Вивчення та побудова діаграми стану залізо-вуглець було започатковано в 1868 році Д.К.Черновим, який виявив існування в сталях критичних точок і їх залежність від вмісту в сталях вуглецю.

Діаграма стану “залізо - вуглець” наведена на рис 1. Існують дві діаграми фазової рівноваги – стабільна та метастабільна. У стабільній діаграмі другим компонентом є графіт, а у метастабільній – цементит. Частина точок і ліній стабільної діаграми мають координати, які відрізняються від аналогічних ліній і точок метастабільної діаграми. Ці лінії нанесені штрихами, а точки – літерами зі штрихом. Метастабільна діаграма визначає фазовий і структурний склад сталей і білих чавунів, а стабільна – сірих чавунів. Координати характерних точок діаграми стану  $Fe-C$  наведені у табл.7.1.

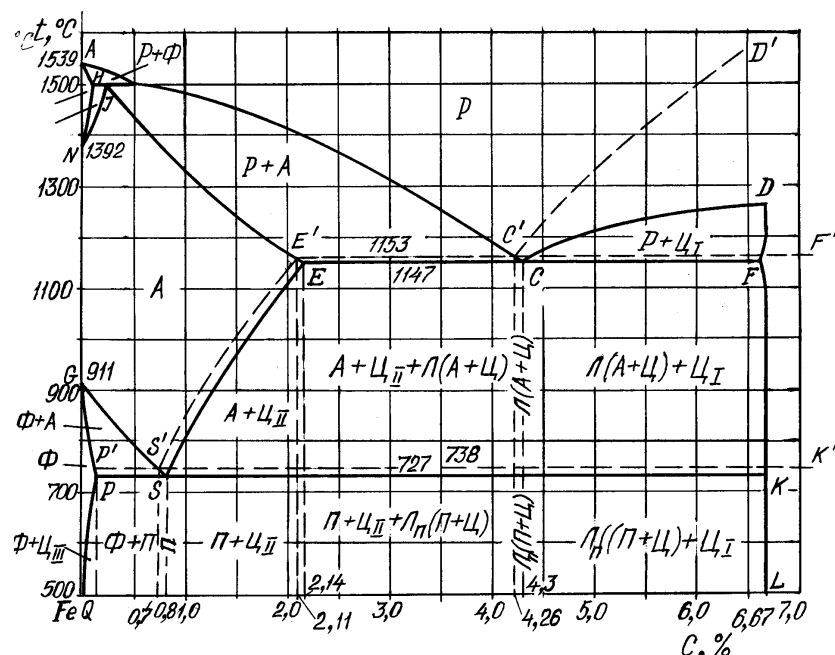


Рис.1 Діаграма стану “залізо – вуглець”

Таблиця 4.1. Характерні точки діаграми стану залізо-вуглець

Метастабільна рівновага			Стабільна рівновага		
Точка	t, °C	C, %	Точка	t, °C	C, %
A	1539	0,00	A	1539	0,00
B	1499	0,50	B	1499	0,50
C	1147	4,30	C'	1153	4,26
D	~1260	6,67	N	1392	0,00
N	1392	0,00	H	1499	0,10
H	1499	0,10	J	1499	0,16
J	1499	0,16	E'	1153	2,11
E	1147	2,14	G	911	0,00
F	1147	6,67	S'	738	0,70
G	911	0,00	P'	738	0,02
P	727	0,02	Q	20	0,006
S	727	0,80			
K	727	6,67			
Q	20	0,006			

Основними компонентами залізобуглецевих сплавів є залізо і вуглець.

*Залізо* – це сріблясто-сірий метал з атомним номером 26, атомним радіусом 0,127нм, атомною масою 55,85, густиною 7860 кг/м<sup>3</sup> та температурою плавлення 1539±5<sup>0</sup>С. Залізо - поліморфний метал. В інтервалі температур 1539...1392<sup>0</sup>С існує δ-залізо з ОЦК-граткою і періодом 0,293 нм, в інтервалі температур 1392...911<sup>0</sup>С – γ-залізо з ГЦК-граткою і періодом 0,364 нм, а при температурах, нижчих за 911<sup>0</sup>С – α-залізо з ОЦК-граткою з періодом 0,286 нм. При температурі 768<sup>0</sup>С (точка Кюрі) залізо зазнає магнітне перетворення - нижче цієї температури залізо феромагнітно, а вище – парамагнітно. Технічно чисте залізо має такі механічні властивості: σ<sub>в</sub>=250МПа; σ<sub>т</sub> = 120 МПа; 800НВ; δ = 50% і ψ = 85%.

*Вуглець* – це неметалевий елемент з атомним номером 6, атомним радіусом 0,077нм, атомною масою 12,011 густиною 2500кг/м<sup>3</sup> та температурою плавлення 3500<sup>0</sup>С. Вуглець існує в двох модифікаціях: графіту і алмазу. У

звичайних умовах він знаходиться у вигляді графіту, але може існувати і у вигляді метастабільного алмазу. Графіт має гексагональну шарувату гратку, де відстань між шарами становить 0,34 нм, а між атомами у шарі – 0,14 нм. Завдяки шаруватості міцність графіту невелика –  $\sigma_{\text{в}}=20$  МПа (при 20<sup>0</sup>С). Алмаз має складну кубічну гратку з періодом 0,1545 нм, у якому діють надзвичайно сильні ковалентні міжатомні зв'язки, що обумовлює високу твердість алмазу.

Вуглець розчиняється у залізі в рідкому та твердому станах, а також утворює з залізом хімічну сполуку Fe<sub>3</sub>C (цементит), а у високовуглецевих сплавах може існувати і у вигляді графіту.

Основними фазами, які утворюються в залізобуглецевих сплавах, є необмежений рідкий розчин вуглецю в залізі (Р), ферит (Ф), аустеніт (А), цементит (Ц) і графіт (Г).

*Ферит* – це твердий розчин проникнення вуглецю в  $\alpha$ - або  $\delta$ -залізі. Максимальна розчинність вуглецю в  $\delta$ -залізі становить 0,1% при 1499<sup>0</sup>С (т.Н), в  $\alpha$ -залізі – 0,02% при 727<sup>0</sup>С (т.Р), а при кімнатній температурі вона зменшується до 0,006%. Така низька розчинність вуглецю в Fe <sub>$\alpha$</sub> (Fe <sub>$\delta$</sub> ) обумовлена малими розмірами пор в ОЦК гратці. Ферит – м'яка, пластична фаза з такими механічними властивостями: -  $\sigma_{\text{в}}=250$ МПа;  $\sigma_{\text{т}}=120$ МПа;  $\delta=50\%$  і  $\Psi=80\%$ ; КСУ=2,5 МДж/м<sup>2</sup>; 800...900НВ. Області існування на діаграмі Fe-Fe<sub>3</sub>C: чистого  $\delta$ -фериту – АНН,  $\alpha$ -фериту – GPQ.

*Аустеніт* – це твердий розчин проникнення вуглецю в  $\gamma$  – залізі. Максимальна розчинність вуглецю в  $\gamma$  – залізі значно вище, ніж у Fe <sub>$\alpha$</sub>  і становить 2,14% при 1147<sup>0</sup>С, що пов'язано з більшими розмірами пор в ГЦК гратці. При зниженні температури розчинність вуглецю в  $\gamma$ -залізі зменшується і при температурі 727<sup>0</sup>С становить 0,8%. Аустеніт більш тверда (1700...2000НВ) і міцна ( $\sigma_{\text{в}} = 500...800$ МПа), ніж ферит, але дуже пластична фаза. Область існування чистого аустеніту на діаграмі Fe-Fe<sub>3</sub>C - NJESG.

*Цементит* – це хімічна сполука заліза з вуглецем, карбід заліза Fe<sub>3</sub>C. Температура плавлення приблизно 1260<sup>0</sup>С. Труднощі з визначенням цієї температури пов'язані з нестійкістю цементиту при нагріванні, тобто його розпадом з утворенням аустеніту і графіту. Цементит при температурах нижче

210<sup>0</sup>С має слабкі феромагнітні властивості, а при цій температурі (при нагріванні) втрачає феромагнетизм. Цементит має складну орторомбічну ґратку, в елементарній комірці якої розміщені 12 атомів заліза і 4 атоми вуглецю. Цементит має високу твердість (~8000НВ) і крихкість. На діаграмі стану Fe-Fe<sub>3</sub>C цементиту відповідає вертикальна лінія DFKL.

*Графіт* – це вуглець, який виділяється у високовуглецевих сплавах у вільному стані при повільному охолодженні (за стабільною діаграмою стану “залізо – графіт”).

#### **4.2 Процеси, які відбуваються при температурах, які відповідають лініям діаграми стану “залізо – цементит”**

На діаграмі Fe-Fe<sub>3</sub>C точка A (рис.1.) відповідає температурі плавлення чистого заліза (1539<sup>0</sup>С), точка N (1392<sup>0</sup>С) - температурі поліморфного Fe<sub>δ</sub> ↔ Fe<sub>γ</sub>-перетворення, G (911<sup>0</sup>С) - поліморфного Fe<sub>γ</sub> ↔ Fe<sub>α</sub>-перетворення, D (1260<sup>0</sup>С) - температурі плавлення цементиту. Точки H і P характеризують граничну концентрацію вуглецю відповідно у високо - та низькотемпературному фериті, а точка E - в аустеніті.

Перетворення в залізобуглецевих сплавах відбуваються як при твердінні рідкої фази (первинна кристалізація), так і в твердому стані (вторинна кристалізація). Первинна кристалізація відбувається в інтервалі температур між лініями ліквідус (ABCD) і солідус (AHJECF). Вторинна кристалізація пов'язана з поліморфним перетворенням заліза і змінною розчинністю вуглецю в γ- та α-залізі.

Лінії діаграми стану залізо-цементит мають такі позначення та фізичний зміст.

Лінія ABCD - лінія ліквідус - визначає температуру, при якій починається процес первинної кристалізації із рідкого сплаву, при цьому лінія AB показує температуру початку кристалізації δ-фериту, BC - аустеніту, CD - цементиту первинного (Ц<sub>1</sub>).

Лінія AHJECF - лінія солідус - визначає температуру, при якій закінчується процес первинної кристалізації, при цьому лінія AH показує

температуру кінця кристалізації  $\delta$ -фериту,  $JE$  - аустеніту. Лінія  $HJB$  - це лінія перитектичного перетворення, суть якого полягає в тому, що  $\delta$ -ферит, який утворився до цієї температури, реагує з рідким сплавом, що залишився, утворюючи при цьому аустеніт:  $P_B + \Phi_H \rightarrow A_J$ .

Якщо сплав містить 0,16%С, то рідка фаза і  $\delta$ -ферит повністю витрачаються і після закінчення перитектичного перетворення залишається тільки аустеніт, а якщо сплав містить понад 0,1 і до 0,16 чи понад 0,16 і до 0,5%С, то в надлишку залишається відповідно  $\delta$ -ферит чи рідка фаза, тобто фазовий склад при завершенні перитектичного перетворення сплавів, що містять від 0,1 до 0,16%С, -  $\delta$ -ферит + аустеніт, а сплавів з вмістом вуглецю від 0,16 до 0,5% - аустеніт + рідка фаза.

Лінія  $ECF$  - це лінія евтектичного перетворення, суть якого полягає в тому, що рідка фаза, що містить 4,3%С, кристалізується з утворенням механічної суміші кристалів аустеніту, що містить 2,14%С, і цементиту:



Евтектична суміш аустеніту і цементиту називається *ледебуритом*. Ледебурит містить 4,3%С, має високу твердість ( $> 6000HB$ ) і крихкість. Тому присутність ледебуриту в структурі сплавів, що містять 2,14...6,67%С, обумовлює їх нездатність до обробки тиском і утруднює обробку різанням.

Лінія  $NH$  - це лінія, яка відповідає температурі початку поліморфного ( $\delta \rightarrow A$ ) - перетворення, а лінія  $NJ$  - кінця цього процесу.

Лінія  $GS$  - це лінія, яка відповідає температурі початку поліморфного ( $A \rightarrow \alpha\text{-}\Phi$ ) - перетворення, а лінія  $GP$  - кінця цього процесу.

Лінія  $ES$  - це лінія максимальної розчинності вуглецю в  $\gamma$ -залізі в залежності від температури, лінія, що відповідає температурі початку виділення надлишкового вуглецю з аустеніту внаслідок зменшення його розчинності в  $\gamma$ -залізі при зниженні температури від 2,14% при 1147<sup>0</sup>С до 0,8% при 727<sup>0</sup>С, у вигляді цементиту, який називають вторинним ( $C_{II}$ ).

Лінія  $PQ$  - це лінія максимальної розчинності вуглецю в  $\alpha$ -залізі, лінія, яка відповідає температурі початку виділення надлишкового вуглецю з  $\alpha$ -

фериту у вигляді третинного цементиту ( $\text{Ц}_{\text{III}}$ ). Надлишок вуглецю в  $\alpha$ -фериті з'являється при охолодженні внаслідок зменшення розчинності вуглецю в  $\alpha$ -залізі при зниженні температури з 0,02% при  $727^{\circ}\text{C}$  до 0,006% при  $20^{\circ}\text{C}$ .

Лінія  $PSK$  - це лінія евтектоїдного перетворення, суть якого полягає у перетворенні аустеніту, що містить 0,8%С, на суміш двох інших твердих фаз:  $\alpha$ -фериту з вмістом 0,02%С і цементиту:



Ця евтектоїдна суміш фериту і цементиту отримала назву *перліт*. Назва структури пов'язана з тим, що під мікроскопом на травленому мікрошліфі вона має перламутровий перелив. Перліт містить 0,8%С, найчастіше має пластинчасту будову і є відносно міцною структурною складовою:  $\sigma_B=800\dots900\text{МПа}$ ;  $\sigma_{0.2}=450\text{МПа}$ ;  $\delta \leq 16\%$ ;  $\sim 2000\text{НВ}$ .

Евтектоїдне перетворення відбувається також і з аустенітом ледебуриту. Тому ледебурит при температурах нижче  $727^{\circ}\text{C}$  складається з перліту і цементиту і іноді такий ледебурит називають перетвореним ( $\text{Л}_{\text{п}}$ ).

Виходячи з процесів, що відбуваються при температурах, що відповідають лініям діаграми стану залізо-цементит, усі залізовуглецеві сплави можна поділити на дві групи:

1) сплави, що містять до 2,14%С і які в результаті первинної кристалізації отримують пластичну аустенітну структуру;

2) сплави, що містять понад 2,14%С і які після первинної кристалізації отримують тверду і крихку ледебуритну структуру з надлишковими аустенітом чи цементитом або без них.

Ця різниця у структурі після первинної кристалізації обумовлює суттєву відмінність у технологічних і механічних властивостях цих двох груп сплавів. Перша група сплавів має достатньо високу пластичність, що дає змогу виготовляти деталі з них пластичним деформуванням. У другій групі сплавів наявність у структурі евтектики (ледебуриту) робить їх нековкими, але вони мають низьку температуру плавлення і їх використовують як ливарний матеріал.

Залізовуглецеві сплави, що містять до 2,14%С, називають сталями, а

понад 2,14%С - чавунами.

### 4.3 Вуглецеві сталі

Основною продукцією чорної металургії є сталь, при цьому приблизно 90% виготовляється вуглецевої сталі і 10% - легованої. Таким чином, основним металевим матеріалом промисловості є вуглецева сталь.

Вуглецева сталь - це сплав заліза з вуглецем та іншими постійними домішками, який містить до 2,14%С, тобто до складу сталі входять, крім заліза, вуглець і постійні домішки.

Вуглець - обов'язковий компонент сталей, який сильно впливає на властивості сталі. Зі збільшенням вмісту вуглецю змінюється структура сталі: при вмісті 0,8%С вона складається тільки з перліту; менше 0,8%С - з фериту і перліту; понад 0,8%С - з перліту і цементиту вторинного. Відповідно зі зміною структури змінюються властивості сталі. Збільшення вмісту вуглецю в сталі призводить до підвищення її міцності, твердості та зниження пластичності і в'язкості. Такий вплив вуглецю на властивості сталі пояснюється гальмуванням цементитними включеннями руху дислокацій у фериті, а при збільшенні вмісту вуглецю в сталі збільшується кількість цементиту і, відповідно, підвищується його гальмівна роль. Однак границя міцності зростає до вмісту вуглецю 0,8...0,9%, а далі починає знижуватися. Це зниження міцності заевтектоїдних сталей є наслідком утворення цементитного прошарку навколо зерен перліту і підвищення крихкості сталі.

Ударна в'язкість сталі сильно залежить від кількості в ній фериту. При підвищенні вмісту вуглецю до 0,6% кількість фериту різко зменшується, що призводить до падіння ударної в'язкості нижче допустимого рівня для конструкційної сталі (0,3..0,4 МДж/м<sup>2</sup>). Саме тому умовна межа між конструкційними та інструментальними сталями за вмістом вуглецю становить 0,65%.

Вуглець впливає також на фізичні властивості сталі: зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі знижуються її густина, теплопровідність, залишкова індукція, магнітна проникність, росте електричний опір і коерцитивна сила.

### 4.3.1 Вплив постійних домішок на властивості сталі

Постійними домішками в сталі є кремній ( $\leq 0,37\%$ ), марганець ( $\leq 0,8\%$ ), сірка ( $\leq 0,06\%$ ), фосфор ( $\leq 0,07\%$ ).

Марганець і кремній вводять у сталь для розкислення при її виплавлянні.

Кремній сильно підвищує границю текучості  $\sigma_T$  і знижує пластичність сталі. Тому в сталях, які призначені для холодного штампування і глибокої витяжки концентрацію кремнію обмежують на рівні 0,17%, а інколи навіть 0,07%.

Марганець помітно підвищує міцність сталі, практично не знижуючи пластичність і прогартовуваність, зменшує червоноламкість, що викликається впливом сірки.

Сірка є шкідливою домішкою в сталі. Вона потрапляє в сталь з руди чи палива. Із залізом сірка утворює хімічну сполуку  $FeS$ , яка практично не розчиняється у фериті, а створює легкоплавку евтектику з температурою плавлення  $988^{\circ}C$ . Ця евтектика переважно розташовується по межах зерен. Під час гарячого деформування (прокатування, кування) з температурою процесу  $1000\dots 1200^{\circ}C$  евтектика розплавляється, порушується зв'язок між зернами металу, внаслідок чого в місцях розташування евтектики виникають надриви і тріщини. Це явище має назву "червоноламкість". При наявності марганцю в сталі замість  $FeS$  утворюється сульфід марганцю  $MnS$  з температурою плавлення  $1620^{\circ}C$ , завдяки чому усувається явище червоноламкості.

Сірчисті включення знижують ударну в'язкість ( $KCU$ ) і пластичність ( $\delta, \psi$ ), а також границю витривалості ( $\sigma_R$ ). Сірка, крім того, погіршує зварюваність і корозійну стійкість. Тому вміст сірки обмежують: у сталях звичайної якості – до 0,06%, якісних – до 0,04%, високоякісних – до 0,025%.

Фосфор є також шкідливою домішкою. Він розчиняється у фериті і при цьому сильно спотворює кристалічну ґратку заліза, внаслідок чого підвищуються границі міцності та текучості, але знижуються пластичність і в'язкість сталі. Фосфор підвищує поріг холодноламкості, тобто температуру переходу сталі у крихкий стан. Шкідливий вплив фосфору посилюється внаслідок великої схильності його до ліквації. Тому кількість фосфору в сталях



також обмежують: у сталях звичайної якості – до 0,04%, в якісних – до 0,035%, а високоякісних – до 0,025%.

#### 4.3. 2 Класифікація та маркування вуглецевих сталей

Вуглецеві сталі класифікують за кількома ознаками: за рівноважною структурою, за хімічним складом, за ступенем розкислення, за якістю та за призначенням.

За рівноважною структурою вуглецеві сталі поділяються на три групи:

доевтектоїдні – сталі, які містять від 0,02 до 0,8%С, структура яких складається з фериту і перліту;

евтектоїдні – сталі, які містять 0,8%С, структура яких складається з перліту;

заевтектоїдні – сталі, які містять понад 0,8 до 2,14%С, структура яких складається з перліту і цементиту вторинного.

Сплави заліза з вуглецем, які містять до 0,02%С називають технічним залізом. Структура таких сплавів складається в основному з фериту.

Мікроструктури доевтектоїдної, евтектоїдної, заевтектоїдної сталей і технічного заліза наведені на рис.2

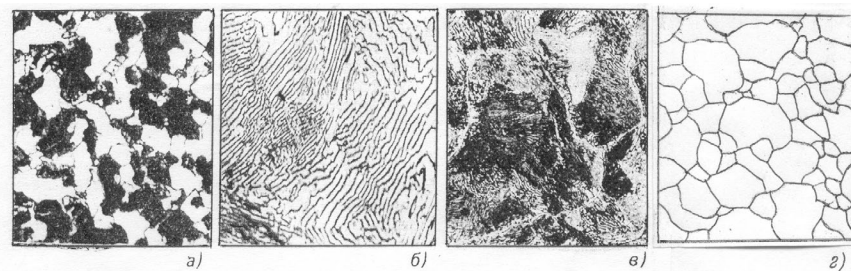


Рис.2. Мікроструктури доевтектоїдної (а), евтектоїдної (б), заевтектоїдної (в) сталей і технічно чистого заліза (г)

За хімічним складом (вмістом вуглецю) вуглецеві сталі поділяють на низьковуглецеві (<0,3%С), середньовуглецеві (0,3...0,6%С) та високовуглецеві (>0,6%С).

За ступенем розкислення сталі поділяють на киплячі ( $\leq 0,07\%Si$ ), напівспокійні ( $0,07 < Si < 0,17\%$ ) та спокійні ( $0,17 < Si < 0,37\%$ ). Киплячу сталь

позначають літерами “кп” наприкінці марки сталі, наприклад: Ст3кп, 05кп; напівспокійну сталь – літерами “пс”, наприклад: Ст3пс, 08пс; спокійну сталь у більшості випадків літерами не позначають за виключенням сталей звичайної якості, які позначають літерами “сп”, наприклад Ст3сп.

Якість сталі визначається в першу чергу кількістю шкідливих домішок – сірки та фосфору. Тому в основу класифікації за якістю покладено вміст в сталі Р і S. За цією ознакою вуглецеві сталі поділяють на сталі звичайної якості ( $S \leq 0,06\%$ ,  $P \leq 0,07\%$ ), якісні ( $S \leq 0,04\%$ ,  $P \leq 0,035\%$ ) та високоякісні ( $S \leq 0,025\%$ ,  $P \leq 0,025\%$ ).

За призначенням вуглецеві сталі поділяють на конструкційні (для деталей машин і будівельних конструкцій) та інструментальні.

*Конструкційні сталі* повинні поєднувати достатню міцність і в'язкість. Таким вимогам відповідають доевтектоїдні сталі.

Конструкційні сталі за технологічною ознакою поділяються на ливарні та на сталі, що деформуються. Сталі, що деформуються, в свою чергу поділяються, в залежності від вмісту шкідливих домішок, на звичайної якості, якісні та автоматні.

Сталі звичайної якості, відповідно до ГОСТ 380-88, маркують літерами “Ст” і цифрами, які вказують номер марки, а наприкінці марки ставлять, в залежності від ступеня розкислення, літери “кп”, “пс” або “сп”. Із сталей цієї групи виготовляють гарячекатаний прокат (балки, прутки, швелери листи, труби), застосовують для будівельних конструкцій та маловідповідальних деталей машин.

Вуглецеві якісні сталі, відповідно до ГОСТ 1050-88, маркують двозначним числом, що вказує середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Ступінь розкислення позначається літерами “кп”, “пс”, які ставляться після числа. В спокійних сталях літери “сп” не ставлять. Наприклад, 05кп, 08кп, 10, 15, ...35, 40, ...85.

Сталі марок 05, 08, 10 після відпалювання добре штампуються в холодному стані. Низьковуглецеві сталі марок 15, 20, 25 належать до тих, що цементуються. Середньовуглецеві сталі 30, 35, 40, 45 і 50 належать до сталей,

що поліпшуються. З таких сталей виготовляють вали, шатуни, шестерні та інші деталі. Високовуглецеві сталі марок 60, 65, 70, 75, 80 і 85 використовують для пружин, ресор, тросів. Із сталі 60 виготовляють суцільнокатані колеса, валки прокатних станів.

*Автоматні сталі* (ГОСТ 1414-75) мають підвищену оброблюваність різанням, що забезпечується підвищеним вмістом сірки (до 0,25%) і фосфору (до 0,15%). Маркують літерою "А" і числом, яке вказує середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка: А12, А20, А30 і А35. Оброблюваність різанням поліпшується також введенням у вуглецеву сталь свинцю у кількості 0,15...0,30%. При маркуванні таких сталей після літери "А" ставлять літеру "С": АС14, АС40. Автоматні сталі мають понижені механічні властивості, тому їх використовують тільки для малонавантажених деталей.

*Ливарні сталі* (ГОСТ 977-88) маркують числом, що вказує вміст вуглецю в сотих частках відсотка, та літерою "Л" в кінці марки, наприклад 15Л, 20Л, 25Л тощо. Ливарні сталі використовують для деталей арматури, великих шестерень, валків та інших деталей.

*Інструментальні вуглецеві сталі* за якістю поділяються на якісні та високоякісні. Відповідно до ГОСТ 1435-74 якісні інструментальні сталі маркують літерою "У" і числом, що вказує середній вміст вуглецю в десятих частках відсотка: У7, У8, У9... У13. У марках високоякісних інструментальних сталей в кінці марки ставлять літеру "А", наприклад, У7А, У8А... У13А.

Інструментальні сталі з відносно низьким вмістом вуглецю (У7, У8) мають високу в'язкість і використовуються для виготовлення зубил, молотків, кернерів, викруток, штампів тощо. Заевтектоїдні сталі (У9...У13) застосовують для інструментів, що потребують високої твердості та не дуже високої в'язкості: мітчиків, сверدل, напилків, ножівок, вимірювальних інструментів. Недоліками вуглецевих інструментальних сталей є їх незначна прогартовуваність і низька теплостійкість (до 200<sup>0</sup>С).

## 4.4 Леговані сталі

### 4.4.1 Вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза і на ферит

Легованими називають сталі, у складі яких є легуючі елементи. А легуючими називають елементи, які спеціально вводять в сталь для отримання певних властивостей. Основними легуючими елементами в сталях є: *Mn, Si, Cr, Ni, Mo, Co, Cu, Ti, V, Nb, Al, B, W*.

Вартість легованих сталей значно вища вартості вуглецевих сталей тому, що легуючі елементи суттєво дорожчі за залізо, тому деталі з легованих сталей застосовують тільки після термічної обробки, коли використовується позитивний і враховується негативний вплив легуючих елементів на сталь.

Усі легуючі елементи за впливом на поліморфізм заліза поділяють на дві групи:

- Елементи першої групи (*Ni, Mn, C, N, Cu*) підвищують точку  $A_4$  і знижують точку  $A_3$ , тобто розширюють  $\gamma$ - і звужують  $\alpha$ -область (рис.3, а) на діаграмі стану «Fe-легуючий елемент».

- Елементи другої групи, навпаки, знижують точку  $A_4$  і підвищують точку  $A_3$ , тобто розширюють  $\alpha$ - і звужують  $\gamma$ -область. До цієї групи належать: *Si, Cr, Al, Mo, W, V, Ti, B, Zr* тощо (рис.3, б).

У легованих сталях при певному вмісті елементів першої групи (правіше точки 1, рис.3, а) утворюється стійка аустенітна структура, яка не зазнає поліморфного ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) перетворення, а елементів другої групи (правіше точки 2, рис.3, б) - феритна структура без ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) перетворення від температури плавлення до кімнатної температури.

Більшість легуючих елементів (*Si, Ni, Mn, Co, Cr, Mo, W* та інші) розчиняються у фериті і утворюють тверді розчини заміщення, змінюючи параметри ґратки  $Fe_\alpha$ , що пов'язано з різницею атомних радіусів заліза і легуючих елементів. Внаслідок зміни параметрів ґратки  $Fe_\alpha$  значно змінюються властивості фериту. Значно підвищують твердість і знижують в'язкість фериту *Si* і *Mn*, а *Ni* підвищує твердість фериту, не знижуючи його в'язкості. Отож, дуже корисним для сталі легуючим елементом є нікель.

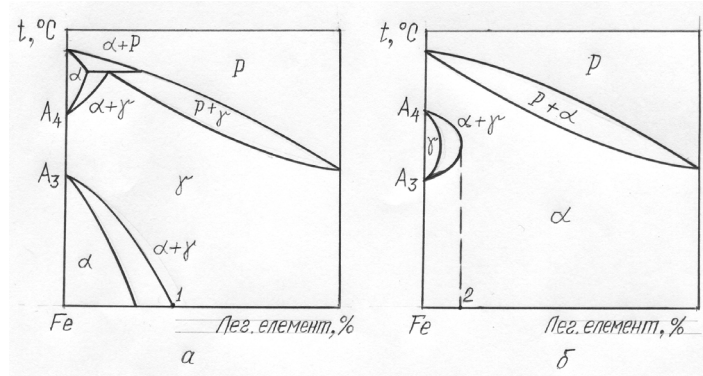


Рис.3. Діаграми стану сплавів «Залізо - легуючий елемент»: а - з легуючими елементами першої групи; б - з легуючими елементами другої групи

Карбідна фаза в легованих сталях. Усі легуючі елементи в сталях, в залежності від схильності до утворення карбідів, поділяють на дві групи:

- елементи першої групи (*Si, Ni, Co, Al*) не утворюють карбіди в сталі;
- елементи другої групи (*Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb, Zr, Ta* та інші) взаємодіють з вуглецем і утворюють карбіди в сталі.

Карбіди за своїм хімічним складом і структурою поділяють на дві групи. До першої групи належать карбіди типу  $Me_3C$ ,  $Me_{23}C_6$ ,  $Me_7C_3$ ,  $Me_6C$ , які утворюють *Fe, Mn, Cr, Mo, W*. Карбіди цієї групи мають складну кристалічну структуру і легко розчиняються при нагріванні в аустеніті. Карбіди другої групи ( $MeC$ ,  $Me_2C$ ) утворюють такі метали, як *Mo, W, V, Ti, Nb, Zr*. Вони належать до фаз проникнення, мають просту кристалічну будову і важко розчиняються в аустеніті.

Усі карбіди мають високу температуру плавлення і твердість; особливо - карбіди другої групи.

#### 4.4.2 Вплив легуючих елементів на перетворення в сталі

Вплив легуючих елементів на кінетику розпаду аустеніту. Легуючі елементи, що не утворюють карбіди в сталі (за виключенням *Co*), уповільнюють процес розпаду аустеніту, тобто зміщують С-подібні криві на діаграмі ізотермічного перетворення аустеніту вправо (рис.4 а), тим самим знижуючи критичну швидкість гартування і підвищуючи прогартовуваність

сталі.

В сталях, які леговані карбідоутворюючими елементами ( $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$ ), є два максимуми швидкості ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 4 б).

У практичному плані найбільш важливою є здатність легуючих елементів уповільнювати розпад аустеніту в області перлітного перетворення, що сприяє більш глибокій прогартуваності та переохолодженню аустеніту до інтервалу мартенситного перетворення при більш повільному охолодженні. Найбільш сильно збільшують прогартуваність сталі  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Mo$ ,  $Mn$ , тому вони входять до складу більшості конструкційних легованих сталей. Своєрідно впливають на кінетику розпаду аустеніту  $V$ ,  $Ti$ ,  $Nb$  і частково -  $W$ . Внаслідок того, що карбіди цих елементів при звичайних температурах гартування ( $800\dots 900$  °C) не розчиняються в аустеніті і діють як готові центри кристалізації перліту, то прогартуваність сталі при її легуванні цими елементами знижується. При високій температурі нагрівання при гартуванні карбіди цих елементів вже розчиняються в аустеніті, що призводить до збільшення прогартуваності сталі.

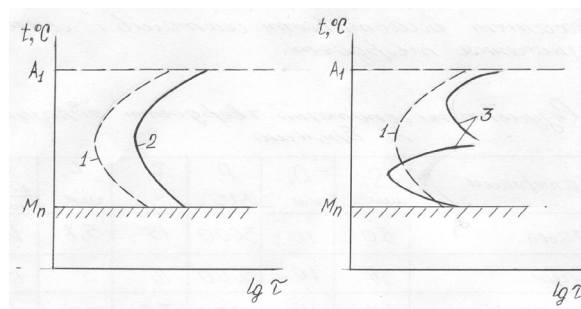


Рис.4. Діаграми ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту: 1 - вуглецева сталь; 2 - сталь, легована некарбідоутворюючими елементами; 3 - сталь, легована карбідоутворюючими елементами

*Вплив легуючих елементів на мартенситне перетворення.* Легуючі елементи впливають на температури початку ( $M_n$ ) і кінця ( $M_k$ ) мартенситного перетворення. Такі елементи, як  $Al$ ,  $Co$  підвищують  $M_n$  і  $M_k$  і зменшують кількість залишкового аустеніту,  $Si$  не впливає на них, а більшість легуючих елементів знижує температурний інтервал мартенситного перетворення, тим самим збільшуючи кількість залишкового аустеніту. Наприклад, 5% марганцю

знижує точку  $M_n$  нижче  $0^\circ\text{C}$ . Тому охолодженням при гартуванні у воді сталі, яка містить  $> 5\% Mn$ , можна тільки зафіксувати аустенітний стан.

*Вплив легуючих елементів на ріст зерна аустеніту.* Усі легуючі елементи (за виключенням  $Mn$  і  $B$ ) зменшують схильність аустенітного зерна до його росту. А ось  $Mn$  і  $B$ , навпаки, сприяють росту зерна аустеніту. Елементи, що не утворюють карбіди, слабо, а карбідоутворюючі елементи ( $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$ ,  $V$ ,  $Ti$ ) сильно, гальмують ріст зерна аустеніту при нагріванні, що пов'язано з утворенням в сталі стійких карбідів.

*Вплив легуючих елементів на перетворення при відпусканні.* Легуючі елементи уповільнюють процес розпаду мартенситу. Такі елементи, як  $Ni$ ,  $Mn$  впливають на цей процес мало, а  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $Si$  та інші - дуже помітно. Це пов'язано з тим, що процеси при відпусканні мають дифузійний характер, і легуючі елементи уповільнюють карбідне перетворення. Тому для отримання однакових результатів сталь, леговану такими елементами, як  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $Si$  тощо, слід нагрівати при відпусканні до вищої температури або збільшувати тривалість відпускання у порівнянні з вуглецевими сталями.

#### **4.4.3. Класифікація та маркування легованих сталей**

Леговані сталі можуть бути класифіковані за чотирма ознаками: за рівноважною структурою, за структурою після охолодження на повітрі (у нормалізованому стані), за хімічним складом і за призначенням.

За рівноважною структурою леговані сталі поділяють на такі групи:

- *доевтектоїдні* сталі, структура яких - ферит і перліт;
- *евтектоїдні* сталі, які мають перлітну структуру;
- *заевтектоїдні* сталі, структура яких - перліт і вторинні карбіди;
- *ледебуритні* сталі, у структурі яких є первинні карбіди, що виділилися із рідкої фази; а у литому стані надлишкові карбіди сумісно з аустенітом утворюють евтектику - ледебурит.

- *аустенітні* сталі, структура яких складається тільки з аустеніту (при високому вмісті легуючих елементів першої групи за впливом на поліморфізм заліза);

- *феритні* сталі, структура яких складається тільки з фериту (при високому вмісті легуючих елементів другої групи за впливом на поліморфізм заліза).

За структурою після охолодження на повітрі леговані сталі поділяють на три основні класи: перлітний, мартенситний і аустенітний.

*Перлітні* сталі мають невисокий вміст легуючих елементів (до 5...6%). При охолодженні таких сталей на повітрі крива охолодження перетинає С-криві в області перлітного розпаду. Тому в результаті розпаду аустеніту утворюються феритно-цементитні суміші різної ступені дисперсності: перліт, сорбіт, троостит (рис.5, а).

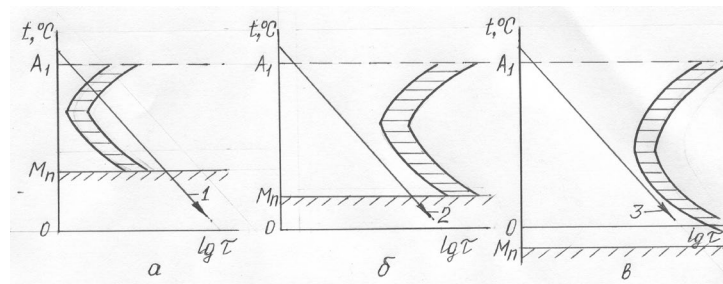


Рис. 5 .Діаграми ізотермічного перетворення аустеніту для сталей перлітного (а), мартенситного (б) і аустенітного (в) класів з накладеними кривими охолодження на повітрі (1, 2, 3)

*Мартенситні* сталі містять 6...13 % легуючих елементів. При такому вмісті легуючих елементів С-криві зміщені вправо настільки, що при охолодженні на повітрі аустеніт переохолоджується до точки  $M_n$  і перетворюється в мартенсит (рис.5, б).

*Аустенітні* сталі містять понад 13 % легуючих елементів. При такому високому вмісті легуючих елементів у сталі, крім підвищення стійкості переохолодженого аустеніту, точка  $M_n$  знижується нижче 0 °С, тому сталь, охолоджена на повітрі при звичайних умовах (температура вище 0 °С), зберігає аустенітний стан (рис.5, в).

За хімічним складом леговані сталі поділяють:

- в залежності від легуючих елементів - на хромисті, хромонікелеві, хромонікельмолібденові, кремністі тощо;



- в залежності від загального вмісту легуючих елементів - на низьколеговані (до 2,5 %), леговані (2,5...10 %) та високолеговані (понад 10 %);
- в залежності від якості - на якісні (до 0,04 % *S* і 0,035 % *P*), високоякісні (до 0,025 % *P* і *S*) та особливо високоякісні (до 0,015 % *S* і 0,025 % *P*).

За призначенням леговані сталі поділяють на конструкційні, інструментальні та сталі з особливими властивостями.

Для позначення марок легованих сталей в Україні прийнята літерно-цифрова система, згідно з якою кожна марка сталі складається з певного поєднання літер і цифр, які показують приблизний хімічний склад сталі. Марка сталі звичайно починається з одно-, дво- або тризначного числа, яке показує вміст (середній чи граничний) вуглецю в сталі: однозначне - в десятих (інструментальна сталь), дво- або тризначне - в сотих частках відсотка (конструкційна сталь або сталь з особливими властивостями). Числа на початку марки відсутні, якщо інструментальна сталь містить 1 % і більше вуглецю.

Легуючі елементи позначають такими літерами: А - азот, Б - ніобій, В - вольфрам, Г - марганець, Д - мідь, Е - селен, К - кобальт, Н - нікель, М - молібден, П - фосфор, Р - бор, С - кремній, Т - титан, Ф - ванадій, Х - хром, Ц - цирконій, Ч - рідкоземельні метали (РЗМ), Ю - алюміній.

Числа, що стоять за літерами, вказують приблизний (середній) вміст легуючого елемента, вказаного цими літерами в цілих відсотках. Якщо вміст легуючого елемента близько 1 % або менше, то цифра відсутня. Літера А вказує: на наявність в сталі азоту, якщо вона стоїть всередині марки; якщо на початку (А12) - автоматна, в кінці марки - високоякісна. Наприклад, сталь 20ХНЗА - конструкційна, легована, високоякісна (А) сталь, яка містить ~0,2 % С, ~1 % Cr, 3 % Ni; сталь 15Х17АГ14 - нержавіюча сталь, що містить ≤0,15 % С, ~17 % Cr, <1 % N, ~14 % Mn; сталь 4ХВ2С - інструментальна сталь, якісна, що містить ~0,4 % С, ~1 % Cr, 2 % W, ~1 % Si; сталь Х6ВФ - інструментальна сталь, якісна, що містить ≥1 % С, ~6 % Cr, ~1 % W, <1 % V.

Для деяких груп сталей застосовують додаткові позначення. Марки кулькопідшипникових сталей починаються з літери Ш, швидкорізальних - з літери Р (від слова „рапід” - швидкий), магнітнотвердих - з літери Е,

електротехнічних - з літери Э. Вміст вуглецю у цих марках не вказується. Наприклад, сталь ШХ15СГ - це кулькопідшипникова сталь, що містить  $\sim 1,5\%$  Cr,  $\sim 1\%$  Si,  $\sim 1\%$  Mn, тобто число, що стоїть за літерою X вказує середній вміст хрому в десятих частках відсотка; сталь Р6М5 - це швидкорізальна сталь, що містить  $\sim 6\%$  W і  $\sim 5\%$  Mo, тобто число, яке стоїть за літерою Р вказує середній вміст вольфраму в цілих відсотках.

#### 4.4.4 Конструкційні леговані сталі

Конструкційні сталі в залежності від комплексу обробок для одержання оптимальних службових властивостей деталей, а також за призначенням поділяються на такі групи:

- 1) сталі, що цементуються;
- 2) сталі, що поліпшуються;
- 3) ресорно-пружинні сталі;
- 4) високоміцні сталі;
- 5) кулькопідшипникові сталі;
- 6) зносостійкі сталі.

*Сталі, що цементуються.* До цієї групи належать низько- та середньолеговані сталі з вмістом вуглецю від 0,1 до 0,25%, які забезпечують після цементації (чи ціанування), гартування та низького відпускання високу поверхневу твердість ( $HRC\ 58\dots 62$ ) при в'язкій, але достатньо міцній серцевині ( $HRC\ 35\dots 45$ ,  $KCU = 0,6\dots 1,0\ МДж/м^2$ ). Такі сталі використовують для виготовлення деталей машин, що працюють в умовах змінних і ударних навантажень і одночасно на зношення.

Основними легуючими елементами сталей цієї групи є Cr, Mn, Ni, Mo, Ti, V, B, W тощо. Карбідо- та нітридоутворюючі елементи (Cr, Mn, Mo та ін.) підвищують прогартовуваність, поверхневу твердість, стійкість до зношення і контактну витривалість. Ni підвищує в'язкість серцевини та поверхневого шару і знижує поріг холодноламкості. Легування сталі ванадієм, титаном, алюмінієм призводить до утворення дисперсних нітридів ( $VN$ ,  $TiN$ ,  $AlN$ ), карбідів ( $TiC$ ,  $VC$ ), що сприяє подрібненню зерна. А це забезпечує зниження

крихкості та підвищення в'язкості сталі, що дуже важливо при роботі в умовах динамічних і знакозмінних навантажень. Бор підвищує прогартовуваність і міцність сталі, але знижує її в'язкість і пластичність.

Леговані сталі, що цементуються, за механічними властивостями поділяють на дві групи: сталі середньої міцності з  $\sigma_{0,2} < 700$  МПа (15Х, 15ХФ) і підвищеної міцності з  $\sigma_{0,2} = 700 \dots 1100$  МПа (12Х2Н4А, 18Х2Н4МА та ін.).

*Сталі, що поліпшуються.* До цієї групи відносять сталі, які використовують після поліпшення (гартування+високе відпускання). Ці сталі (40Х, 40ХН, 40ХФА, 30ХГСА тощо) містять 0,3...0,5 % С і 1...6 % легуючих елементів. Сталі загартовують з 820...860 °С у маслі, а високе відпускання проводять при температурах 500...560°С з подальшим охолодженням у воді, маслі або на повітрі (залежно від складу сталі). Структура сталі після такої обробки – сорбіт відпуску. Сталі цієї групи застосовують для виготовлення відповідальних деталей (валів, шатунів, штоків та інших деталей), які працюють в умовах циклічних або ударних навантажень. Тому сталі, що поліпшуються, повинні мати високі значення  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCU$  та малу чутливість до надрізу. Основними легуючими елементами сталей цієї групи є  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $V$ ,  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Mo$ ,  $W$ ,  $B$ . Легуючі елементи підвищують міцність і прогартовуваність сталі. Крім того, ванадій (~0,15 %) сприяє подрібненню її зерна і підвищенню в'язкості,  $Mo$  і  $W$  усувають відпускну крихкість.

*Ресорно-пружинні сталі.* Основні вимоги до сталей цієї групи - це забезпечення високих значень  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_m(\sigma_{0,2})$ ,  $\sigma_{-1}$ , а також необхідної пластичності та опору крихкому руйнуванню.

Сталі для пружин і ресор містять 0,5...0,75 % вуглецю. Їх легують кремнієм (до 2,8 %), марганцем (до 1,2 %), хромом (до 1,2 %) і нікелем (до 1,7 %). Широке застосування мають кремністі сталі 55С2, 60С2А, 70С3А. Кращі технологічні властивості, ніж у кремністих сталей, має сталь 50ХФА, яку широко використовують для виготовлення ресор і клапанних пружин.

Термічна обробка легованих ресорно-пружинних сталей складається з гартування ( $t_H = 850 \dots 880$  °С) та середнього відпускання ( $t_H = 400 \dots 480$  °С).

Для сталей, які використовуються для пружин і ресор, необхідно

забезпечити наскрізну прогартовуваність деталей для отримання після відпускання структури трооститу по всьому перерізу. Високі пружні та міцнісні властивості пружинної сталі досягаються також при ізотермічному гартуванні. Суттєве підвищення границі витривалості ресор досягається їх поверхневим наклепом (дробоструменева чи гідроабразивна обробка), у процесі чого в поверхневому шарі деталей утворюються залишкові напруги стиску.

*Високоміцні сталі.* Це сталі, що мають границю міцності 1500...2000 МПа і більше, достатній запас пластичності та в'язкості. До високоміцних сталей належать:

- середньовуглецеві комплексно-леговані сталі, які використовують після гартування з низьким відпусканням або після термомеханічної обробки (30ХГСН2А, 40ХН2МА, 38ХН3МА);

- мартенситностаріючі сталі (03Н18К9М5Т, Н12К15М10, Н10Х11М2Т);

- метастабільні аустенітні (ТРИП, ПНП) сталі (*TRIP* - *Transformation Induced Plasticity*, ПНП - пластичність, наведена перетворенням).

Термомеханічна обробка забезпечує середньовуглецевим сталям типу 30ХГСН2А і 40ХН2МА високу міцність ( $\sigma_{\epsilon}=2000...2800$  МПа) при достатній пластичності ( $\delta=8...6$  %) і в'язкості ( $KCU=0,30...0,15$  МДж/м<sup>2</sup>).

Мартенситностаріючі сталі зміцнюються за рахунок мартенситного ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) перетворення, яке супроводжується фазовим наклепом, і штучного старіння при 450...500°C, коли з мартенситу виділяються дисперсні частинки інтерметалідів типу  $Ni_3Ti$ ,  $NiTi$ ,  $Fe_2Mo$  тощо. Механічні властивості після старіння:  $\sigma_{\epsilon}=2000$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1800$  МПа,  $\delta=12$  %,  $\Psi=50$  %,  $KCU=0,50$  МДж/м<sup>2</sup>. В'язкість руйнування  $K_{Ic}=50...70$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Основним легуючим елементом мартенситностаріючих сталей є нікель. Ефективність старіння підвищують додатковим легуванням сталі титаном, алюмінієм, молібденом, ніобієм і кобальтом. Підвищення в'язкості цих сталей забезпечується низьким ( $\leq 0,03$  %) вмістом вуглецю.

Мартенситностаріючі сталі використовують у літако- і ракетобудуванні, а також у криогенній техніці - завдяки високій пластичності і в'язкості при низьких температурах.

У метастабільних аустенітних (ТРП, ПНП) сталях поєднання високої міцності та пластичності забезпечується підбором певного складу сталі, режимів термічної обробки та температурного деформування. До цієї групи належать сталі, що містять 0,2...0,3 % C, 8...10 % Cr, 8...25 % Ni, 2...6 % Mo 1...2,5 % Mn, до 2 % Si, наприклад, 30X9H8M4Г2C2, 25H25M4Г1. Склад сталі повинен бути таким, щоб точка  $M_n$  лежала нижче 0°C. Для отримання підвищеної міцності такі сталі після гартування з 1000...1100 °C піддають пластичному деформуванню з великими ступенями деформації (50...80 %) в інтервалі температур 450...600 °C. У результаті відбувається наклеп аустеніту, а також його збіднення вуглецем і легуючими елементами внаслідок виділення карбідів і додаткове дисперсійне зміцнення. Після гартування, наклепу і деформаційного старіння аустеніту ТРП-сталі набувають оптимальних механічних властивостей:  $\sigma_s=1800...2000$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1400...1700$  МПа,  $\delta > 20$  % (до 100...150 %) тощо.

*Кулькопідшипникові сталі* повинні мати високу твердість, міцність, стійкість проти зношення та контактну витривалість. Це досягається підвищенням якості сталі шляхом позапічної обробки синтетичними шлаками, електрошлакового чи вакуумно-дугового переплавлення. В якості кулькопідшипникових використовують високовуглецеві (~1 % C) хромисті сталі (ШХ4, ШХ15). Для деталей великих перерізів такі сталі додатково легують Mn та Si, що дозволяє збільшити їх прогартуваність (ШХ15СГ). Як попередню термічну обробку застосовують сферодизуюче відпалювання, а в якості заключної - гартування у маслі з нагріванням до температур 840...860 °C і низьке відпускання при 150...170 °C. Після такої обробки структура сталі складається з мартенситу і дрібних частинок карбідів, а твердість досягає HRC 61...63. Для підшипників, що працюють в агресивних середовищах, використовують нержавіючу сталь 95X18.

*Стійкі до зношення сталі.* Стійкість деталей до зношення звичайно забезпечується підвищеною твердістю поверхні. Представником цієї групи є високомарганцева аустенітна сталь 110Г13Л (1,10 % C, 13 % Mn, Л - ливарна). Ця сталь після гартування у воді з нагріванням до температур 1050...1100 °C

отримує однофазну аустенітну структуру і має низьку твердість (180...220 *HB*) і високу пластичність ( $\delta = 34...53$  %,  $\Psi = 34...43$  %). Але при такій низькій твердості деталі, виготовлені з цієї сталі, успішно працюють на зношування в умовах абразивного тертя, яке супроводжується дією високого тиску і великих динамічних навантажень (характерно для траків гусениць, щок дробарок, стрілок рейок, зубів ковшів екскаваторів тощо). Це пояснюється підвищеною схильністю цієї сталі до наклепу. Висока стійкість сталі до зношення досягається не тільки деформаційним зміцненням аустеніту, але й утворенням мартенситу з гексагональною ( $\epsilon$ ) або ромбоедричною ( $\epsilon'$ ) ґратками. Твердість сталі після деформування на 70 % підвищується до 530 *HB*.

Вироби, які працюють в умовах кавітаційного зношування, виготовляють із сталей 30X10Г10, 0X14Г12М.

#### **4.4.5 Інструментальні сталі**

Інструментальні сталі поділяють на чотири типи:

- пониженої прогартовуваності (переважно вуглецеві);
- підвищеної прогартовуваності ( леговані);
- штампові;
- швидкорізальні.

До особливої групи інструментальних матеріалів належать тверді сплави.

*Леговані інструментальні сталі.* До цієї групи належать сталі, які містять 1...3 % легуючих елементів і мають підвищену прогартовуваність (наприклад, 9ХС, ХВГ, ХВ5). Інструменти з цих сталей загартовують у маслі. Після гартування проводять низьке відпускання. Твердість після такої обробки – *HRC* 65...62 (в залежності від температури відпускання). Сталі цієї групи використовують для інструментів, які нагріваються у процесі роботи до температур не вище 200...250 °С.

*Швидкорізальні сталі.* На відміну від інших інструментальних сталей, швидкорізальні сталі мають високу теплостійкість (червоностійкість), тобто здатність зберігати мартенситну структуру при підвищених температурах (до 600...650 °С). Основними легуючими елементами швидкорізальних сталей, які

забезпечують їх теплостійкість, є *W* і *Mo*. Підвищує теплостійкість (до 645...650 °С) і твердість після термічної обробки (*HRC* 67...70) *Co*, у меншій мірі - *V*. Ванадій, утворюючи дуже твердий карбід *VC*, підвищує стійкість інструменту до зношення, але погіршує здатність до шліфування.

До найрозповсюдженіших швидкорізальних сталей належать марки P18, P9, P6M5. Ці сталі рекомендуються для всіх видів інструментів при обробці вуглецевих і легованих сталей. Для обробки високоміцних, нержавіючих, жароміцних сталей і сплавів застосовують сталі, які містять кобальт: P18K5F2, P9M4K8, P9K5 тощо.

Швидкорізальні сталі відносяться до ледебуритного класу. Їх фазовий склад у відпаленому стані представляє собою легований ферит і карбіди. Кількість карбідної фази в сталі P18 досягає 25...30 %, а в сталі P6M5 – 22 %. У структурі литої швидкорізальної сталі є складна евтектика, яка розміщується по границях зерен.

Для надання швидкорізальній сталі високої твердості і теплостійкості її піддають гартуванню і багатократному відпусканню.

Температура гартування сталі P18 становить 1270 °С, а P6M5 – 1220 °С. Такі високі температури необхідні для більш повного розчинення карбідів в аустеніті і отримання після гартування більш стійкого мартенситу. Структура швидкорізальної сталі після гартування складається з високолегованого мартенситу, що містить 0,3...0,4 % С, надлишкових карбідів і залишкового аустеніту, кількість якого становить 25...30 % у сталі P18 і 28..34 % - у сталі P6M5. Залишковий аустеніт знижує твердість і різальні властивості сталі. Для усунення залишкового аустеніту інструмент піддають триразовому відпусканню при 550...570°С з витримкою при цій температурі 45...60 хв. Вміст аустеніту зменшується до 2 %, а твердість підвищується з *HRC* 62 до *HRC* 64. Інколи для зменшення вмісту залишкового аустеніту безпосередньо після гартування інструмент охолоджують до -80 °С, після чого проводять одно- або двократне відпускання при 550...570 °С.

*Штампові сталі* застосовують для виготовлення штампів холодного та гарячого деформування, пуансонів, матриць, фільєр, прес-форм для лиття під

тиском.

Сталі для штампів холодного деформування повинні мати високу твердість та стійкість до зношення, високу в'язкість, а сталі для штампів гарячого деформування - додатково повинні мати високу теплостійкість, термостійкість і теплопровідність. Для штампів холодного деформування застосовують сталі X6BФ, X12, X12M, X12Ф1 тощо, а для штампів гарячого деформування - 7X3, 5XHM, 4XMФC, 3X2B8Ф тощо. Сталі для штампів холодного деформування піддають гартуванню і відпусканню на твердість в межах *HRC* 58...63 (в залежності від призначення). Сталі для штампів гарячого деформування піддають гартуванню і відпусканню на твердість в межах *HRC* 38...50.

*Інструментальні тверді сплави* одержують методом порошкової металургії. Вони складаються з карбідів таких тугоплавких металів, як вольфрам, титан і тантал (*WC, TiC, TaC*), які зв'язуються кобальтом. У промисловості застосовують тверді сплави трьох груп:

- вольфрамові, які складаються з карбіду вольфраму (*WC*) і кобальту (BK3, BK6, BK8, BK10);
- титановольфрамові, до складу яких входять карбіди вольфраму і титану (*WC, TiC*) і кобальту (Т30К4, Т15К6, Т14К8 тощо);
- титанотанталовольфрамові, до складу яких входять карбіди вольфраму, титану і танталу (*WC, TiC, TaC*) і кобальту (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9 тощо).

Літери, які стоять на початку марки, позначають групу: В - вольфрамова, Т - титановольфрамова, ТТ – титанотанталовольфрамова. Літера К позначає кобальт, а число за цією літерою - вміст кобальту в цілих відсотках. Число, яке стоїть за літерою Т, вказує на вміст карбіду титану в цілих відсотках, а за двома літерами ТТ - на сумарний вміст карбідів титану і танталу в цілих відсотках.

Структура твердих сплавів - це частинки карбідів, навколо яких розташовано кобальт. При високому вмісті *TiC* (Т30К4) структура сплаву складається із твердого розчину карбіду вольфраму в карбіді титану і кобальту, тому що карбід вольфраму повністю розчиняється у карбіді титану. Зі збільшенням вмісту кобальту у сплаві стійкість до зношення знижується, а



експлуатаційна міцність підвищується.

Характерною особливістю твердих сплавів є їх висока червоностійкість, яка досягає 800...1000 °С, і твердість - *HRA* 87...92, а недоліками - підвищена крихкість і мала міцність на розтяг.

#### **4.4.6 Корозійностійкі (нержавіючі) сталі**

Корозія - процес руйнування металу під дією зовнішнього середовища. За механізмом протікання розрізняють хімічну корозію, яка виникає під дією газів чи неелектролітів (нафта), і електрохімічну, що відбувається при контакті металу з електролітами - кислотами, лугами, солями, вологою атмосферою, ґрунтом, морською водою. Корозійний процес звичайно відбувається шляхом виникнення на поверхні сплаву мікрогальванічних елементів внаслідок наявності там ділянок, які мають різний електрохімічний потенціал (фази, границі зерен, тіло зерна, інші дефекти структури), і розчинення анодних ділянок в електроліті.

Сталі, стійкі до електрохімічної корозії, називаються корозійностійкими (нержавіючими). Корозійна стійкість досягається введенням у сталь елементів, які утворюють на поверхні щільні, міцно зв'язані з основою захисні плівки, які перешкоджають безпосередньому контакту з агресивним середовищем, а також підвищують електрохімічний потенціал у даному середовищі. Додавання в сталь більше 12...14 % хрому різко змінює її електрохімічний потенціал з від'ємного на додатній, внаслідок чого сталь стає корозійностійкою в атмосфері і інших середовищах.

Нержавіючі сталі за хімічним складом поділяють на дві основні групи: хромисті та хромонікелеві.

*Хромисті* нержавіючі сталі застосовують трьох типів: з 13, 17 і 25 % хрому. У сталях з 13 % хрому вміст вуглецю може змінюватись від 0,08 до 0,40 %. Структура і властивості хромистих сталей залежить від вмісту хрому і вуглецю. У залежності від структури у нормалізованому стані хромисті сталі поділяють на такі класи: феритний (08X13, 12X17, 15X25T, 15X28),

мартенситно-феритний (12X13) і мартенситний (20X13, 30X13, 40X13).

Сталі з низьким вмістом вуглецю (08X13, 12X13) пластичні, добре зварюються і штамуються. Їх піддають гартуванню у маслі ( $t_H=1000\dots1050^\circ\text{C}$ ) з високим відпусканням ( $t_H=600\dots800^\circ\text{C}$ ). Їх застосовують для виготовлення деталей, на які діють ударні навантаження (клапани гідравлічних пресів), або які працюють у слабких агресивних середовищах (лопасті гідравлічних і парових турбін і компресора). Сталі 30X13, 40X13 мають високу твердість і міцність. Їх загартовують з  $1000\dots1050^\circ\text{C}$  у маслі та відпускають при  $200\dots300^\circ\text{C}$ . Після такої обробки вони зберігають мартенситну структуру з твердістю *HRC* 50...52 і достатню корозійну стійкість. Використовують ці сталі для виготовлення карбюраторних голок, пружин, хірургічних інструментів тощо. Високохромисті сталі феритного класу (12X17, 15X25Т, 15X28) мають вищу корозійну стійкість, ніж сталі, що містять 13 % хрому. Ці сталі не зміцнюються термічною обробкою і схильні до сильного росту зерна при нагріванні вище  $850^\circ\text{C}$ . Для подрібнення зерна і підвищення опору міжкристалітної корозії їх легують титаном.

*Хромонікелеві* нержавіючі сталі, в залежності від структури, поділяють на аустенітні, аустеніто-мартенситні та аустеніто-феритні. Структура цих сталей залежить від вмісту вуглецю, хрому, нікелю та інших елементів.

Сталі аустенітного класу містять  $\sim 18\% \text{ Cr}$ ,  $9\dots10\% \text{ Ni}$  (12X18Н9, 17X18Н9). Після гартування вони отримують аустенітну структуру, яка має високу пластичність ( $\delta=40\dots50\%$ ,  $\Psi=50\dots60\%$ ), високу корозійну стійкість в окислювальних середовищах. Сталі цього класу характеризуються високою технологічністю. Їх недоліком є схильність до міжкристалітної корозії, що зменшується додаванням до складу цих сталей сильних карбідоутворюючих елементів (титану або ніобію) у кількості, що дорівнює п'ятикратному вмісту вуглецю (12X18Н10Т, 08X18Н12Б). Аустенітні сталі не схильні до крихкого руйнування при низьких температурах, тому їх широко використовують у криогенній техніці, для виготовлення місткостей для зберігання скраплених газів тощо.

До аустеніто-мартенситного класу належать сталі 09X15Н8Ю,

09X17H7Ю, які використовують в основному як високоміцні. Вони добре зварюються, стійкі проти атмосферної корозії. Для забезпечення достатньої міцності та підвищеної корозійної стійкості сталь 09X15H8Ю піддають гартуванню на аустеніт ( $t_n=925\dots975$  °C) з наступною обробкою холодом (- 70 °C) і старінням (350...380 °C). Після такої обробки сталь набуває таких властивостей:  $\sigma_s=1200\dots1300$  МПа,  $\delta=14$  %. Застосовують сталі цього класу для виготовлення обшивки, соплових конструкцій і силових елементів вузлів літальних апаратів.

До аустеніто-феритного класу належать сталі 08X22H6T, 03X23H6, 08X21H6M2T та інші. Ці сталі після гартування у воді з нагріванням до температур 1000...1100 °C мають структуру, що складається із зерен аустеніту і фериту, які розміщені рівномірно і характеризуються невисокою міцністю ( $\sigma_s=510\dots700$  МПа,  $\sigma_{0,2}=300\dots500$  МПа) і достатньо високою пластичністю ( $\delta=18\dots25$  %,  $\psi=45\dots55$  %). Пластична деформація призводить до значного зміцнення сталі. Наприклад, сталь 08X22H6T після деформування зі ступінню 35 % набуває таких властивостей:  $\sigma_s=1350$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1200$  МПа,  $\delta=8$  %.

Перевагами сталей цього класу перед аустенітними є:

- більш оптимальний комплекс механічних властивостей;
- менша схильність до міжкристалітної корозії;
- більш низький вміст дефіцитного нікелю;
- менша схильність до росту зерна при нагріванні;
- висока стійкість в окислювально-відновлювальних середовищах;
- здатність до деформування у режимі надпластичності.

Аустенітно-феритні сталі застосовують у хімічному і харчовому машинобудуванні, суднобудуванні, літакобудуванні, медицині.

#### **4.5 Чавуни**

Чавунами називають залізовуглецеві сплави, що містять від 2,14 до 6,67%С, тобто чавуни відрізняються від сталей більш високим вмістом вуглецю і структурою. Тому вони мають інші, порівняно зі сталями, технологічні характеристики – кращі ливарні властивості і низьку здатність до пластичного

деформування.

Вуглець у чавунах може бути в двох станах: у хімічно зв'язаному (цементит або інші карбіди) та у вільному (графітні включення).

Чавуни, в яких майже весь вуглець знаходиться у хімічно зв'язаному стані, називають білими. Таку назву вони отримали за видом злому, який має матово-білий колір. Фазовий склад білих чавунів при нормальній температурі – цементит і ферит. Білі чавуни мають високу твердість (4500...5500НВ) і крихкість, практично не піддаються обробці різальним інструментом. Білі чавуни за хімічним складом (вмістом вуглецю) і за структурою поділяються на доєвтектичні, евтектичні та заєвтектичні.

Доєвтектичні – це чавуни, що містять від 2,14 до 4,3%С, структура яких складається з перліту, ледебуриту і цементиту вторинного. Евтектичний чавун містить 4,3%С і його структура повністю ледебуритна. Заєвтектичні чавуни – це чавуни, що містять понад 4,3 до 6,67%С, структурний склад яких ледебурит і цементит первинний. Мікроструктури білих чавунів наведені на рис.6

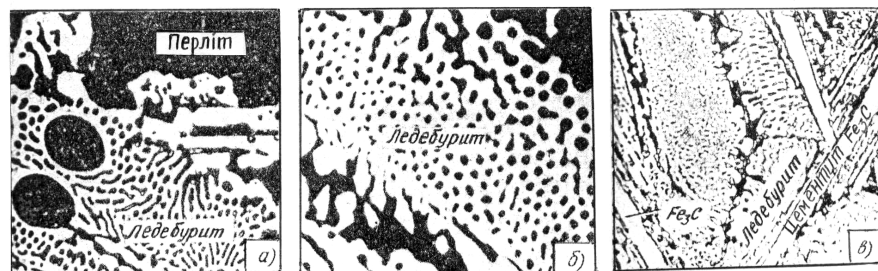


Рис.6 Мікроструктури білих доєвтектичного (а), евтектичного (б) і заєвтектичного (в) чавунів

Чавуни, в яких вуглець частково або майже повністю знаходиться у вільному стані у вигляді графітних включень називаються сірими, тому що графіт надає злому цих чавунів сірий колір. Структура сірих чавунів складається з металевої (сталистої) основи, в якій розташовані графітні включення.

Графітні включення можуть мати пластинчасту, пластівчасту і кулясту форми.

Чавуни з пластинчастою формою графіту називають звичайними сірими,

з пластівчастою – *ковкими*, а з кулястою – *високоміцними*.

Графіт має низьку міцність ( $\sigma_B=20$  МПа) і тому можна рахувати, у першому наближенні, що місця, які він займає - це “пустоти” у металі. Форма цих “пустот”, тобто графітних включень, значно впливає на міцність і пластичність чавуну. Пластинчаста форма в найбільшій ступені послаблює металеву основу, виступаючи концентратором напруги, особливо при розтягуванні. Куляста форма є найбільш привабливою, тому, що такі включення графіту в меншій ступені знижують міцність і пластичність металевої основи. Тому чавуни з кулястим графітом, які мають значно вищу міцність, ніж чавуни з пластинчастим графітом, отримали назву високоміцних.

Присутність графіту у структурі чавунів надає їм низку переваг у порівнянні зі сталлю:

- 1) краща оброблюваність різанням;
- 2) більш високі антифрикційні властивості;
- 3) здатність швидко гасити вібрацію і коливання;
- 4) нечутливість до поверхневих дефектів.

Сірі, високоміцні та ковкі чавуни за структурою металевої основи поділяються на феритні, феритно-перлітні та перлітні. Структура феритних чавунів складається з фериту і графіту, феритно-перлітних – з фериту, перліту і графіту, перлітних – з перліту і графіту (рис.7).

пластичність.

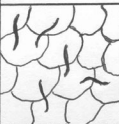

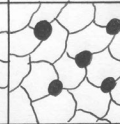


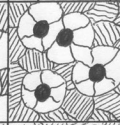


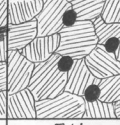
Металева основа	Форма графітних включень		
	Пластинчаста	Пластівчаста	Куляста
Ферит			
Ферит+перліт			
Перліт			
Позначення	C4	K4	B4

Рис.7 Класифікація чавунів за структурою металевої основи та за формою графітних включень

Структура металевої основи має значний вплив на властивості чавуну. Феритні чавуни мають найменшу міцність, твердість, найбільш високу пластичність і, навпаки, перлітні – найбільшу міцність, твердість, найменшу

У промисловості застосовуються також чавуни, в яких є структурні ознаки як сірих, так і білих чавунів. Такі чавуни називаються половинчастими. У цих чавунах частина вуглецю (>0,8%) перебуває у зв'язному стані, а решта – у вигляді графіту. Тому в структурі половинчастих чавунів, поряд зі вторинним цементитом або цементитом ледебуриту, є графіт, тобто їх структура може складатися із  $\text{П}+\text{Ц}_{\text{II}}+\text{Г}$  або  $\text{П}+\text{Л}+\text{Г}$ .

#### **4.5.1 Вплив хімічного складу і швидкості охолодження на структуру і властивості чавуну.**

Чавун – це багатокомпонентний сплав, до складу якого, крім  $Fe$  і  $C$ , входять  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$ . Для цілеспрямованого впливу на процес отримання білих або сірих чавунів необхідно знати як впливають ці елементи, а також швидкість охолодження на процес графітизації, тобто на процес утворення графіту.

Вуглець і кремній є сильними графітизуючими елементами. Тому для отримання сірого чавуну слід збільшувати кількість кремнію, а білого – зменшувати його вміст.

Марганець, навпаки, утруднює процес графітизації чавуну і сприяє отриманню структури білого чавуну. Це пов'язано з тим, що  $Mn$  - карбідоутворюючий елемент. Тому вміст марганцю в сірих чавунах не повинен перевищувати 1,25%.

Сірка є шкідливою домішкою у чавуні. Вона погіршує ливарні властивості та утруднює процес графітизації чавуну, тому вміст сірки в сірих чавунах обмежується 0,15%.

Фосфор практично не впливає на процес графітизації чавуну, але підвищує його рідкотекучість, що пов'язано з утворенням легкоплавкої евтектики. Крім того, фосфідна евтектика має високу твердість, завдяки чому підвищується зносостійкість сірого чавуну, а також його крихкість. Звичайно вміст фосфору в сірому чавуні не перевищує 0,3...0,4%.

Значний вплив на структуру чавуну має швидкість охолодження. При повільному охолодженні процес кристалізації відбувається за стабільною діаграмою, а при швидкому охолодженні – за метастабільною, тобто повільне охолодження сприяє отриманню сірого чавуну, а швидке охолодження – білого.

*Сірі, високоміцні та ковкі чавуни.* Сірі чавуни з пластинчастим графітом кристалізуються відповідно до стабільної діаграми залізо - графіт. Вміст вуглецю в цих чавунах становить 2,4...3,8%. Маркують їх літерами “СЧ” і числом, що вказує мінімальне значення границі міцності при розтягуванні в кгс/мм<sup>2</sup>. У відповідності з ГОСТ 1412-85 стандартизовані шість основних марок сірого чавуну: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30 і СЧ35. Для потреб споживачів допускаються також чавуни марок СЧ18, СЧ21 і СЧ24.

Сірі чавуни широко використовуються у верстато- та машинобудуванні.

Феритні сірі чавуни (СЧ10, СЧ15) використовують для слабко- і середньонавантажених деталей: кришок, фланців, маховиків, супортів, корпусів редукторів, гальмових барабанів, дисків зчеплення тощо.

Феритно-перлітні сірі чавуни (СЧ20, СЧ25) застосовуються для деталей, що працюють при підвищених і динамічних навантаженнях: блоки циліндрів, картери двигунів, поршні, барабани зчеплення, станини верстатів та ін.

Перлітні чавуни (СЧ30, СЧ35) використовують для виготовлення деталей, що працюють при високих навантаженнях: станини потужних верстатів і механізмів, гільзи блоків циліндрів, розподільчі вали, зубчасті колеса та ін.

*Ковкий чавун.* Ковкий чавун отримують з білого тривалим графітизуючим відпалюванням, графік якого наведено на рис.5.6. Тобто спочатку отримують виливок із білого доєвтектичного чавуну складу: 2,4...2,9%С; 1,0...1,6%Si; 0,3...1,0%Mn; не більше: 0,18%P; 0,20%S та 0,08%Cr і товщиною стінок не більше 50 мм.

При відпалюванні виливок нагрівають у печі до температури 950...1000<sup>0</sup>С, при якій фазовий склад чавуну А+Ц. Під час тривалої витримки в межах цих температур (до 15 год.) відбувається перша стадія графітизації, під час якої нестійкий цементит розпадається на аустеніт і графіт, який набуває форму пластівців.

Прискорене охолодження до кімнатної температури після першої стадії графітизації призводить до перетворення аустеніту на перліт і отримання ковкого чавуну на перлітній основі.

Для отримання ковкого чавуну на феритній чи ферито-перлітній основі необхідно провести другу стадію графітизації тривалістю до 30 годин, яку можна здійснити двома способами.

За першим способом після першої стадії графітизації проводять відносно швидке охолодження чавуну до температури  $\sim 760^{\circ}\text{C}$ , а потім його дуже повільно охолоджують до  $720^{\circ}\text{C}$ . При такому повільному охолодженні від  $760$  до  $720^{\circ}\text{C}$  процес евтектоїдного перетворення відбувається за стабільною діаграмою стану “залізо – графіт”:

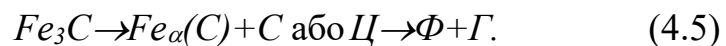


Графіт, який утворюється в результаті евтектоїдного перетворення, нашаровується на графіт, що утворився на першій стадії графітизації.

За другим способом швидке охолодження після першої стадії графітизації проводять до  $\sim 720^{\circ}\text{C}$  і при такій температурі роблять тривалу ізотермічну витримку. При такому режимі охолодження евтектоїдне перетворення аустеніту відбувається за метастабільною діаграмою стану “залізо – цементит”:



Цементит вторинний і цементит перліту при витримці розпадається за реакцією:



Якщо другу стадію графітизації проводити повністю, то після охолодження отримуємо ковкий чавун на феритній основі, а якщо не повністю – на ферито-перлітній основі.

Ковкі чавуни маркують літерами “КЧ” і двома числами: перше число вказує мінімальне значення границі міцності при розтягуванні, кгс/мм<sup>2</sup>, а друге – відносне видовження, %. Стандартом (ГОСТ 1215-79) передбачені такі марки ковких чавунів: феритні – КЧ37-12, КЧ35-10, КЧ33-8, КЧ30-6; перлітні – КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2 і КЧ80-1,5.

Ковкі чавуни широко використовують в автомобілебудуванні та



сільськогосподарському машинобудуванні. З них виготовляють картери, муфти, важелі, деталі рульового керування, кільця ланцюгів, крюки, елементи карданних валів тощо.

*Високоміцні чавуни.* Високоміцні чавуни містять близько 3,0...3,6%С. їх отримують модифікуванням рідкого чавуну перед розливанням магнієм або церієм у кількості близько 0,05%.

Відповідно до ДСТУ 3925-99 високоміцні чавуни з кулястим графітом маркують літерами “ВЧ” і двома числами через дефіс, перше з яких вказує гарантоване значення мінімальної границі міцності в МПа, а друге – мінімальне значення відносно видовження у відсотках. Шкідливими домішками у високоміцних чавунах є фосфор і сірка. Фосфор знижує пластичність чавуну внаслідок утворення крихкого фосфіду, тому його кількість обмежується 0,1%. Сірка знижує механічні властивості чавуну внаслідок утворення з *Mg* або *Se* крихких сульфідів, а також послаблює модифікуючу дію цих елементів. Тому кількість сірки не повинна перевищувати 0,02%, а в деяких марках (ВЧ800-2, ВЧ900-2, ВЧ1000-2) – 0,01%.

Чавуни марок ВЧ350-22, ВЧ400-15 мають феритну основу, ВЧ450-10 і ВЧ500-7 – феритно-перлітну, ВЧ600-3, ВЧ700-2 і ВЧ800-2 – перлітну. А чавун марки ВЧ1000-2 для забезпечення гарантованої границі міцності  $\sigma_B=1000$  МПа піддають ізотермічному гартуванню, в результаті чого отримує бейнітну структуру.

Високоміцні чавуни використовують замість литої сталі у виробках та конструкціях відповідального призначення. З них виготовляють колінчасті вали двигунів, поршневі кільця, втулки, зубчасті колеса, прокатні валки тощо.

*Чавун з вермикулярним графітом (vermiculus (лат.) – хробак).* Вермикулярний графіт, на відміну від пластинчастого має округлі края і менше співвідношення довжини і товщини (2...10 у вермикулярного і значно більше 10 у пластинчастого). Тому вермикулярний графіт значно менше, ніж пластинчастий, послаблює металеву основу. Його можна розглядати як перехідну форму від пластинчастого до кулястого.

Відповідно до ДСТУ 3926-99 чавуни з вермикулярним графітом

маркуються літерами “ЧВГ” і двома числами: перше число – мінімальне значення границі міцності при розтягуванні у МПа, друге – мінімальне значення відносного видовження у відсотках. Наприклад, ЧВГ400-4.