

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ  
СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни «Хімія, пально-мастильні матеріали і авіаційне  
матеріалознавство»  
вибіркових компонент освітньо-професійної програми  
першого (бакалаврського) рівня  
бакалавр

**Аеронавігація**

**за темою № 19 – Діаграма стану залізо-вуглець. Чавуни та сталі.**

**Харків 2022**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2022 № 8

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 22.08.2022 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2022 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 10.08.2022 № 1

**Розробник:**

1. канд. хім. наук, доцент, спеціаліст вищої категорії, викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, Козловська Т. Ф.

**Рецензенти:**

1. канд. хім. наук, доцент, завідувач кафедри екології та біотехнологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, професор Новохатько О. В.
2. канд. техн. наук, доцент, викладач циклової комісії природничих дисциплін Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач-методист, спеціаліст вищої категорії Долударєва Я. С.

### **План лекції**

1. Залізо та його властивості.
2. Вплив легувальних елементів на поліморфні перетворення
3. Діаграма стану системи залізо-вуглець
4. Формування структури сталей і чавунів.
5. Конструкційні та інструментальні сталі. чавуни.

### **Література:**

#### **Основна**

1. Романова Н. В. Загальна та неорганічна хімія : практикум. Київ : Либідь, 2003. 205 с.
2. Кириченко В. І. Загальна хімія : навч. посібник Київ : Вища школа, 2005. 635 с.
3. Басов В. П., Радіонов В. М. Хімія : навч. посібн. 4-те вид. Київ : Каравела, 2004. 302 с.
4. Бочеров А. Д., Жикол О. А., Красовська М. В. Хімія : Довідник з прикладами розв'язання задач. Харків, 2011. 416 с.
5. Григор'єва В. В., Самійленко В.М., Сич А. М., Голуб О. А. Загальна хімія : підручник для студентів нехімічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Київ : Вища школа, 2009. 471 с.
6. Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія. Част. 1. Київ : Педагогічна преса, 2002. 418 с.
7. Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія. Част. 2. Київ : Педагогічна преса, 2000. 783 с.
8. Бойченко С. В., Черняк Л. М., Новікова В. Ф. Контроль якості паливно-мастильних матеріалів. Київ : НАУ, 2012. 308 с.
9. Бойченко С. В., Іванов С. В., Бурлака В. Г. Моторні палива і масла для сучасної техніки : монографія. Київ: НАУ, 2005. 216 с.
10. Бойченко С. В., Спіркін В. Г. Вступ до хімотології палив та олив : навч. посібник. Одеса: Астропринт, 2009. Част. 1. 236 с.
11. Бойченко С. В., Любінін Й. А., Спіркін В. Г. Вступ до хімотології палив та олив : навч. посібник. Одеса: Астропринт, 2009. Част. 2. 276 с.
12. Полянський С.К., Коваленко В.М. Експлуатаційні матеріали для автомобілів і будівельно-дорожніх машин : підручник . Київ : Либідь, 2005. 504с.
13. Животовська К. О, Мамлюк О. В. Авіаційні матеріали та їх обробка : навч. посібник. Київ : Вища освіта, 2003.
14. Гарнець В. М. Матеріалознавство : підручник. Київ : Кондор, 2009.
15. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : навч. посібник. Львів, 2002. 264 с.

16. Більченко О. В., Дудка О. І., Лобода П. І. Матеріалознавство : навч. посібник. Київ : Кондор, 2009.

### Допоміжна

17. Карпинець А. П. Лекції з курсу «Використання експлуатаційних матеріалів та економія паливно-енергетичних ресурсів» : навч. посібник. Горлівка, 2014. 107 с.

18. Чабанний В. Я., Магопець С. О., Мажейка О. Й. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення : навч. посібник. Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2008. ч.1. 353 с.

19. Чабанний В. Я., Магопець С. О., Осипов І. М. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення : навч. посібник. Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2008. ч.2. 500 с.

20. Сизова З.О. Конспект лекцій з дисципліни «Хімотологія» : навч. посібник. Харків, 2013. 83 с.

21. ГСТУ 320.00149943.007-97. Паливо для реактивних двигунів «РТ». [Чинний від 1997-06-15]. Держнафтогазпром України, 1997. 19 с. (Галузевий стандарт України).

22. ГСТУ 320.00149943.011-99. Паливо ТС-1 для реактивних двигунів. [Чинний від 1999-07-01]. Держнафтогазпром України, 1999. 27 с. (Галузевий стандарт України).

23. ДСТУ 4796:2007. Паливо авіаційне для газотурбінних двигунів ДЖЕТ А-1. [Чинний від 2007-10 -01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 8 с. (Національний стандарт України).

24. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні євро. Технічні умови. [Чинний від 2016-01 -01]. Київ : УкрНДНЦ, 2015. 15 с. (Національний стандарт України).

25. ДСТУ 7688 : 2015. Паливо дизельне євро. Технічні умови. [Чинний від 2016-01 -01]. Київ : УкрНДНЦ, 2015. 15 с. (Національний стандарт України).

26. Хільчевський В. В., Кондратюк С. Є, Степаненко В. О., Лопатько К. Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навч. посібник. Київ : «Либідь», 2002. 328 с.

## Текст лекції

### 1. Залізо та його властивості

Сплави на основі заліза є найважливішими сплавами сучасної техніки. Широке застосування сплавів заліза зумовлено його високим вмістом у земній корі (серед металів друге місце після Al), а також наявністю великої кількості залізорудних родовищ. Одним із найбільших у світі є Криворізьке родовище. Разом із тим залізо, як жоден інший метал, може змінювати свої властивості в результаті легування та спеціальної термомеханічної обробки. Сьогодні в техніці застосовують понад 12000 залізних сплавів, головним чином сталей і чавунів – сплавів заліза з вуглецем.

Чисте залізо є сріблясто-сірим блискучим металом. Його щільність –  $7,87\text{--}103\text{ кг/м}^3$ , атомний номер 26, атомна маса 55,85, атомний радіус 0,127 нм, температура плавлення  $1812\text{--}1814\text{ К}$ . Чисте залізо, що одержують зараз, містить 99,99 % Fe, технічні сорти – 99,8–99,9 % Fe.

При підвищенні температури залізо зазнає поліморфних перетворень. Модифікація  $\alpha$ -заліза має ОЦК-гратку з періодом 0,28606 нм, яка стабільна до температури 1183 К. В інтервалі температур 1183–1665 К залізо має ГЦК-структуру (параметр  $a=0,3645\text{ нм}$  при 1183 К) і позначається як  $\gamma$ -залізо. Вище температури 1665 К і до температури плавлення залізо знову має ОЦК-гратку і часто позначається як  $\delta$ -залізо.

Залізо має феромагнітні властивості до температури 1041 К (точка Кюрі). Вище цієї температури залізо є парамагнітним.

Механічні властивості заліза високої чистоти низькі: межа міцності 49,03 МПа, а межа текучості – 24,52 МПа.

З металами залізо утворює розчини заміщення, з вуглецем, азотом, воднем – розчини проникнення. Особливо варто розглянути сполуки розчинів вуглецю в залізі. У рідкій фазі вуглець повністю розчинний у залізі. У твердому стані розчинність вуглецю залежить від типу кристалічної ґратки заліза.

В ОЦК-структурі об'єми тетраедричних і октаедричних пустот (максимальний радіус 0,031 нм) недостатні для розміщення атомів вуглецю (атомний радіус 0,077 нм). Тому розчинність вуглецю в  $\alpha$ -фазі менша від 0,02 %. В  $\alpha$ -залізі реальна розчинність вуглецю може бути підвищена за рахунок дефектів кристалічної структури та за рахунок меж зерен.

У ГЦК-структурі розміри октаедричних пустот (радіус 0,05 нм) достатні для розміщення в них атомів вуглецю. Однак розчинення одного атома вуглецю супроводжується таким спотворенням ґратки, що найближчі пустоти стають

недоступними для інших атомів вуглецю. Тому розчинність вуглецю в  $\gamma$ -фазі становить лише близько 2,14 %.

Вуглець із залізом може утворювати хімічні сполуки, а у високо вуглецевих сплавах вуглець може бути наявним у вигляді графіту. Тому у системі Fe-C розрізняють такі фази:

- рідкий сплав,
- тверді розчини – ферит і аустеніт,
- цементит
- графіт.

*Ферит* – твердий розчин вуглецю та інших домішок в ОЦК- залізі. Розрізняють низькотемпературний ферит з розчинністю вуглецю до 0,02 % і високотемпературний  $\delta$ -ферит із граничною розчинністю вуглецю 0,1 %.

*Аустеніт* – твердий розчин вуглецю та інших домішок в  $\gamma$ -залізі. Гранична розчинність вуглецю в  $\gamma$ -залізі – 2,14 %.

*Цементит* – хімічна сполука заліза з вуглецем – карбід заліза  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Вміст вуглецю у цементиті – 6,67 %. Цементит має складну орторомбічну структуру із щільною упаковкою атомів. До температури 483 К цементит має феромагнітні властивості. Для цементиту властиві мала пластичність і велика твердість. Цементит є метастабільною фазою, дуже твердий і крихкий та слабо магнітний до 210 °С.

В умовах рівноваги у сплавах із високим вмістом вуглецю утворюється графіт. Графіт має гексагональну кристалічну ґратку з відносно невеликими силами взаємодії між базисними площинами, що й обумовлює його високу пластичність і м'якість.

У сплавах Fe-C існують дві високовуглецеві фази:

метастабільна – цементит

стабільна – графіт.

Тому розрізняють дві діаграми стану:

метастабільну Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  і стабільну Fe-C.

*Діаграма стану залізо-цементит*

Діаграма стану Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  охоплює область концентрацій вуглецю від 0 (залізо) до 6,67 % (цементит) і описує метастабільну систему. Утворення графіту замість цементиту, хоча і енергетично вигідніше, але кінетично утворення карбіду заліза більш імовірно.

*Евтектика* (від греч.(грецький) *eutektos* – легко плавкий), рідка система (розчин або розплав), що знаходиться при даному тиску в рівновазі з твердими фазами, число яких дорівнює числу компонентів системи.

Кристалізація такої системи, згідно з правилом фаз відбувається при постійній температурі, як і кристалізація чистих речовин. При цьому утворюється механічна суміш твердих фаз того ж складу (тверда Е.). Для даної системи температура плавлення твердої Е нижче за температуру плавлення суміші будь-якого іншого складу.

*Температура Кюрі* – температура фазового переходу другого роду, за якої відбувається стрибкоподібна зміна властивостей речовини. При температурі Кюрі відбувається фазовий перехід від феромагнетика до парамагнетика або між полярною й неполярною фазами сегнетоелектрика.

*Ліквідус* – крива на фазовій діаграмі, що визначає температуру, вище якої речовина, зокрема сплав, перебуває повністю в рідкому стані.

*Солідус* – крива на фазовій діаграмі, що визначає температуру, нижче якої речовина перебуває в твердій фазі.

При досягненні температури солідуса речовина починає плавитися, проте це не означає, що при цій температурі вона розплавлюється повністю. В певному проміжку температури може існувати розшарування речовини на рідку й тверду фази.

У проміжку температур між солідусом і ліквідусом можливе співіснування розплаву й твердої фази.

На діаграмі (рис. 1) точкам G, N, і A відповідають температури поліморфного перетворення і температура плавлення заліза. Лінія ABC – лінія ліквідуса. Нижче цієї лінії починається кристалізація  $\gamma$ -фериту (AB), аустеніту (BC), первинного цементиту (CD). Лінія FKL відповідає цементиту. Три горизонтальні лінії на діаграмі (HJB, ECF і PSK) свідчать про перебіг трьох нонваріантних реакцій. При 1772 K (1499 °C) (лінія HJB) відбувається перитектична реакція:

***Рідина складу B + ферит складу H аустеніт складу J.***

***Рідина складу C – аустеніт складу E + цементит складу F.***

Утворюється евтектична суміш аустеніту та цементиту, яка називається *ледебуритом*. Ця реакція має місце у сплавах з вмістом вуглецю більше 2,14 %. Доевтектичні сплави після тверднення мають структуру аустеніт + ледебурит (аустеніт +  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Заевтектичні сплави після затвердіння складаються з первинного цементиту та ледебуриту (аустеніт + вторинний  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Евтектичний склад (точка C) після тверднення утворює лише ледебурит.

Ледебурит має стільникову або пластинчасту будову.

При малій швидкості охолодження утворюється стільниковий ледебурит. Це пластини цементиту, куди проросли розгалужені кристаліти аустеніту. При

швидкому охолодженні утворюється пластинчастий ледебурит, що складається з тонких пластин цементиту, розділених аустенітом.

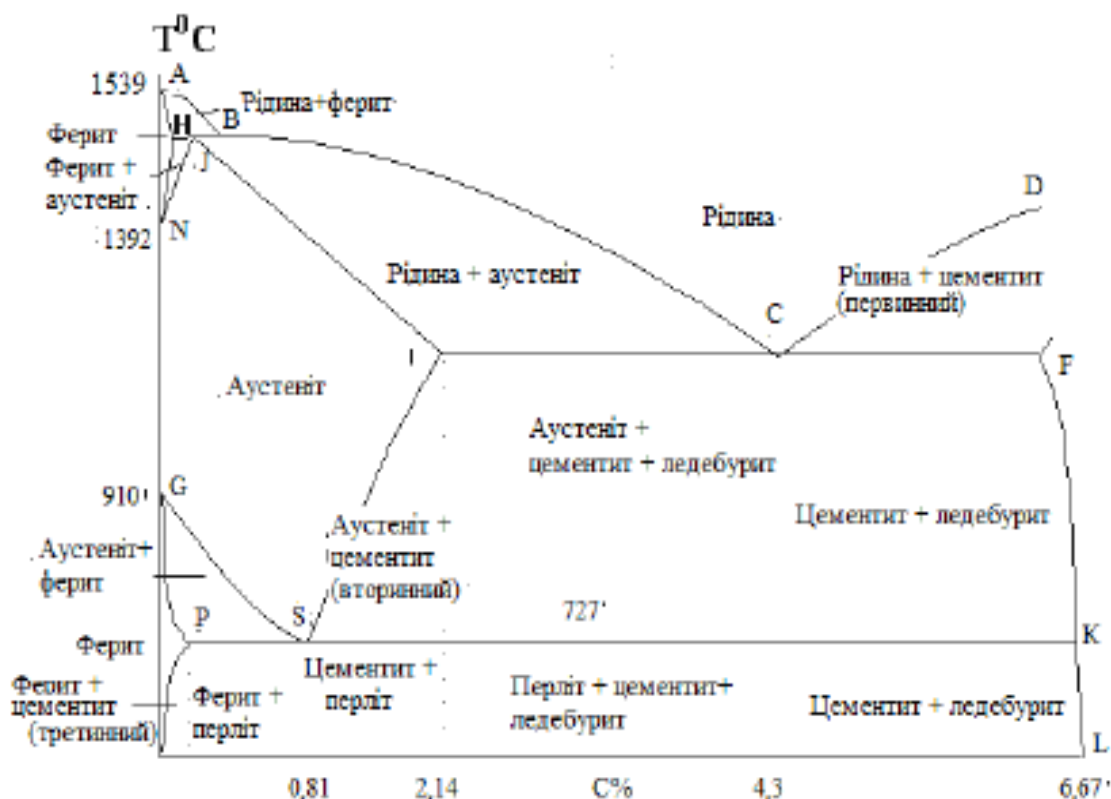


Рисунок 1 – Діаграма стану системи Fe – Fe<sub>3</sub>C Ця реакція з утворенням аустеніту відбувається у сплавах, де вуглець наявний у кількостях від 0,1 до 0,5 %. При температурі 1420 K (1147 °C) (лінія ECF) відбувається евтектична реакція

Необхідно зазначити, що такі структури мають значну крихкість. Наприклад, чавуни містять ледебурит, а тому не піддаються значній пластичній деформації (прокатці, куванню). Однак вони мають більш низькі, ніж сталі, температури плавлення і мають гарні ливарні властивості.

Сплави із вмістом вуглецю меншим ніж 2,14 % при температурі 1420 K (1147 °C), представлені аустенітом. При зниженні температури аустеніт розпадається на аустеніт + ферит (нижче лінії GS) і на аустеніт + вторинний цементит (нижче від лінії ES).

Таким чином, у сталях не утворюється крихка структура ледебуриту, тому сталі легко деформуються при високих і кімнатних температурах.

При 1000 K (727 °C) (лінія PSK) відбувається евтектоїдна реакція.

**Аустеніт складу S – ферит складу P + цементит складу K.**

Евтектоїдна суміш фериту й цементиту, що утворюється, одержала назву

перліт. Сталь, що містить 0,8 % С, називають евтектоїдною. Тут у точці S весь аустеніт перетворюється у перліт. Структура перліту складається із пластинок фериту й цементиту, що чергуються. У заевтектоїдних сталях нижче від температури 1000 К (727 °С) аустеніт перетворюється у перліт. Вторинний цементит виділяється тут по межах колишнього зерна аустеніту у вигляді пластин, закономірно орієнтованих щодо аустеніту. Така структура є крихкою, тому спеціальною термомеханічною обробкою цементиту їй надають сферичної форми. Доевтектоїдні сталі після остаточного охолодження мають таку структуру: ферит + перліт.

У заевтектоїдному чавуні при температурах, нижчих 1000 (727 °С), аустеніт розпадається з утворенням перліту.

Таким чином, сплави заліза з вуглецем при нормальних температурах мають зазначені вище різні структури, однак фазовий склад усіх сплавів однаковий: ферит + цементит.

На рис. 2 показані мікроструктури деяких видів сталей.



Рисунок 2 – Мікроструктури видів сталей: а – мікроструктура сталі із вмістом вуглецю 0,18 %, складається з фериту (світлі ділянки) і перліту (темні ділянки) ( $< 300$ ); б) при подальшому збільшенні ( $< 800$ ) чітко видно, що перліт має пластинчасту будову і включає дві структурні складові – тонкі пластинки цементиту і більш широкі феритні ділянки; в) мікроструктура сталі зі складом вуглецю більше 1 %, де перліт (темний) міститься у сітці з цементиту ( $< 400$ )

### Графітизація

До чавунів належать сплави Fe-C із вмістом вуглецю, більшим від 2,14 %. Залежно від стану вуглецю в сплаві розрізняють:

– **білий чавун**, в якому вуглець перебуває у зв'язаному стані у вигляді карбиду;

– **сірий чавун**, в якому вуглець значною мірою або повністю перебуває у вільному стані у формі пластинчастого графіту (рис. 3, б);

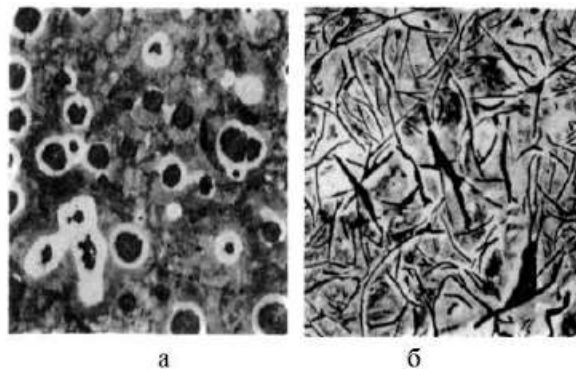


Рисунок 3 – Мікроструктура чавуну: а) високоміцний чавун із кулястими включеннями графіту; б) сірий чавун із пластинчастими і ниткуватими включеннями графіту (х 300)

– високоміцний чавун, в якому вуглець значною мірою або повністю перебуває у вільному стані у формі кулястого графіту (рис. 3, а);

– ковкий чавун, що утворюється при відпалюванні білого чавуну, у результаті якого весь вуглець або значна його частина перебуває у вільному стані у формі пластинчастого графіту.

Природно, що найважливішим питанням теорії чавуну є з'ясування умов утворення графіту, тобто так званої графітизації. Вище вже згадувалося, що утворення цементиту замість графіту при кристалізації сплавів Fe-C більш ймовірно. Але утворення твердих фаз пов'язане з дифузійними процесами. Тому зі статистично розподілених атомів вуглецю в рідкому розчині легше утворити цементит, у якому вміст вуглецю 6,67 %, ніж чистий вуглець. Разом із тим із термодинамічних міркувань графіт має більш стійку фазу, ніж цементит, і в системі, що рухається до рівноваги, цементит повинен розпадатися з утворенням фериту і графіту. Експериментально графіт утворюється з рідкої фази при дуже малій швидкості охолодження. Прискорене охолодження частково або повністю припиняє кристалізацію графіту і сприяє утворенню цементиту. На утворення графіту з рідкої або твердої фази впливають різні включення (графіт,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та ін.), які є центрами кристалізації для графіту.

Якщо чавун, де вуглець перебуває у вигляді цементиту, піддати тривалому нагріванню при високих температурах, то в ньому відбувається процес графітизації. При низьких температурах процес графітизації припиняється через низьку дифузійну рухливість атомів. Збільшення вмісту вуглецю у сталі призводить до підвищення відсоткового вмісту цементиту. Цементит виділяється у вигляді дрібнодисперсних частинок і перешкоджає руху дислокацій. Це приводить до підвищення міцності і зменшення пластичності

сталей. Разом із цим із збільшенням вмісту вуглецю знижуються густина, зростають електричний опір, коерцитивна сила і знижуються теплопровідність, залишкова індукція і магнітна проникність матеріалу. Кремній і марганець. Кремній і марганець потрапляють у сталь у процесі її виробництва в кількостях, що не перевищують 0,73 і 0,8 % відповідно. Кремній сильно підвищує межу текучості, що знижує здатність сталі до холодного штампування. У сталях, призначених для цих цілей, вміст кремнію спеціально знижують.

Марганець помітно підвищує міцність, практично не знижуючи пластичності, і різко знижує крихкість сталей (за рахунок наявності сірки) в умовах високотемпературної деформації.

**Сірка.** Сірка є шкідливою домішкою у сталях. Із залізом вона утворює сполуку FeS, яка розміщується в основному за межами зерен. Із залізом FeS дає евтектику з температурою плавлення 1261 К, при нагріванні металу до температур гарячої деформації (1273–1473 К) евтектика плавиться, порушуючи зв'язок між зернами металу.

Деформація при цих температурах приводить до виникнення тріщин у місцях розташування евтектики. Це явище називається **червоноламкістю**. Марганець, будучи більш активним елементом щодо сірки, порівняно із залізом, зв'язує сірку в тугоплавку сполуку MnS і практично виключає червоноламкість. Негативний вплив сірки на сталь виявляється також у зниженні її пластичності, корозійної стійкості, зварюваності. Тому вміст сірки у промислових сплавах не повинен перевищувати 0,035–0,06 %.

**Фосфор.** Фосфор також є шкідливою домішкою у сталях. Розчиняючись у фериті, фосфор сильно спотворює кристалічну ґратку, що призводить до збільшення межі міцності, плинності, і зменшення пластичності. Встановлено, що фосфор зменшує утворення тріщин. Здатність фосфору до сегрегації за межами зерен також викликає крихкість сталей.

Вміст фосфору в сталях не повинен перевищувати 0,025–0,045 %. Сучасні методи одержання сталей не забезпечують більш глибокого очищення металу від фосфору.

**Азот, кисень, водень.** Ці елементи можуть знаходитися в різних порях металу у газоподібному стані, у твердому розчині, утворювати неметалічні включення – нітриди, оксиди (FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO–MnO, FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>4</sub>N та 20 ін.). Неметалічні включення погіршують властивості металу. Дуже небажаним є розчинений у сталі водень, який значно підвищує крихкість металу.

Радикальним засобом зменшення концентрації зазначених елементів є виплавлення і розливання металу у вакуумі.

## 2. Вплив легувальних елементів на поліморфні перетворення

Усі елементи, за винятком С, N, Н і частково В, утворюють із залізом розчини заміщення. Введення легувальних елементів заміщення істотно впливає на положення точок поліморфного перетворення  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  та  $\gamma \leftrightarrow \delta$  і тим самим визначає температурну область існування  $\alpha$ - і  $\gamma$ -заліза. За цією ознакою всі легувальні елементи поділяють на дві групи.

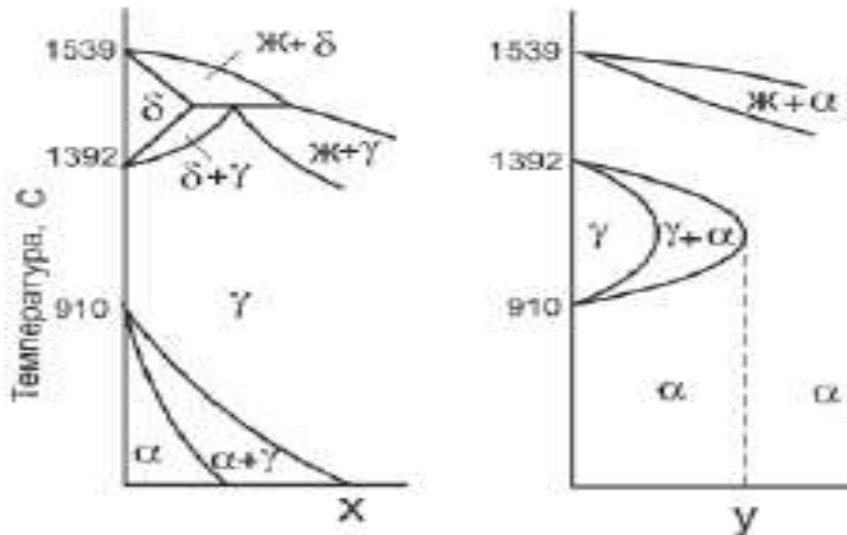


Рисунок 4 – Схематичний вплив легувальних елементів на поліморфізм заліза

До елементів першої групи відносять Ni і Mn. Вони знижують температуру  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення і підвищують температуру точки  $\gamma \leftrightarrow \delta$  перетворення. У результаті на діаграмі Fe-M (М-метал) розширюється область існування  $\gamma$ -фази і звужується область існування  $\alpha$ -фази (рис. 4). Із діаграми випливає, що в сплавах із вмістом легувального елемента, більшим, ніж показано точкою X, відсутнє  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення, і при всіх температурах вони являють собою твердий розчин легувального елемента в  $\gamma$ -залізі. Такі сплави називають аустенітними. Сплави, де  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення відбувається частково, називаються напіваустенітними. До елементів другої групи відносять Cr, Mo, W, V, Al, Si та ін. Вони знижують температуру  $\gamma \leftrightarrow \delta$  перетворення і підвищують температуру  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення. Це призводить до того, що при певній концентрації легувального елемента область існування  $\gamma$ -фази цілком замикається. Якщо концентрація легувального елемента більша, від позначеної точкою Y, то сплави при всіх температурах є твердими розчинами на основі  $\alpha$ -заліза. Такі сплави називаються феритними, а сплави, що мають лише часткове перетворення – напівферитними. У потрійних системах Fe-C-M легувальні

елементи впливають і на температуру переходу перліту в аустеніт. Нікель і марганець знижують цю температуру, а Ti, Mo, Si, Cr та інші елементи – підвищують. Змінюється евтектоїдна концентрація вуглецю і гранична розчинність вуглецю в аустеніті, перитектичні, евтектичні і евтектоїдні перетворення відбуваються не при сталій температурі, як у подвійних системах, а в деякому інтервалі температур. Крім того, змінюються склад і властивості карбідних фаз, оскільки частина атомів заліза заміщується атомами легувальних елементів -  $(\text{FeMn})_3\text{C}$ ,  $(\text{FeCr})_3\text{C}$  та ін. нарешті утворюються самостійні карбіди на основі легувальних елементів. При значних концентраціях легувальні елементи утворюють із залізом або з однією з інтерметалічних сполук, наприклад,  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$ ,  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ ,  $\text{Fe}_3\text{Nb}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{Ti}$  та ін.

#### *Термічна обробка*

Мета термічної обробки полягає у тому, щоб шляхом нагрівання до певної температури і охолодження викликати бажану зміну структури металу. Режими термообробки представляють графічно на діаграмах температура – час (рис. 5).

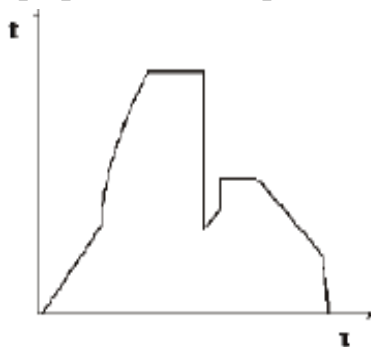


Рисунок 5 – Діаграма температура–час при режимах термообробки

Розрізняють такі види термообробки:

1. Відпал. Відпалу піддають сплави, які були деформаційно зміцнені, сплави, які за рахунок швидкого затвердіння мали неоднорідний склад, сплави з нерівномірним розподілом пружних макродеформацій. Відпал проводять нагріванням сплавів до температури високої рухливості атомів. У такий спосіб усувають сліди попередньої обробки.

2. Другий вид термообробки пов'язаний з фазовими переходами при нагріванні. Сплави нагрівають до температури, вищої від температури фазового переходу, а потім повільно охолоджують, одержуючи рівноважний стан (структурна рівновага).

3. Якщо при нагріванні у сплаві відбулися фазові перетворення, то зворотний фазовий перехід при зниженні температури може відбутися не

повністю. Повнота перетворення залежить від швидкості охолодження. При швидкому охолодженні фіксується високотемпературна фаза. Цей процес називається гартуванням.

4. Четвертий вид термообробки пов'язаний із нагріванням сплаву з метою викликати розпад фази, що утворилася при гартуванні. Такий вид термообробки називається відпуском. Відпуск, що відбувається при кімнатній

температурі, називається

старінням. З діаграми стану можна

з'ясувати, яким видам термічної

обробки можна піддавати сплав і в

яких температурних інтервалах

необхідно проводити обробку. Для

обробки за другим, третім і

четвертим пунктами у сплаві

повинні відбуватися фазові

перетворення у твердому стані,

тобто при нагріванні повинні

відбуватися або істотні зміни

розчинності, або алотропічні

перетворення. Усі сплави, що

лежать ліворуч від точки F (рис. 6,

а), не мають перетворень у

твердому стані і для них

неможлива термічна обробка за

другим, третім або четвертим

пунктами. У будь-якому сплаві, що

лежить праворуч від точки F, при

нагріванні відбувається

розчинення надлишкової фази (у

цьому випадку фази B у  $\alpha$ -

твердому розчині), і загартування може призвести до фіксації пересиченого

твердого розчину (третій пункт термічної обробки), а подальше нагрівання

може викликати виділення надлишкової фази (четвертий пункт термічної

обробки).

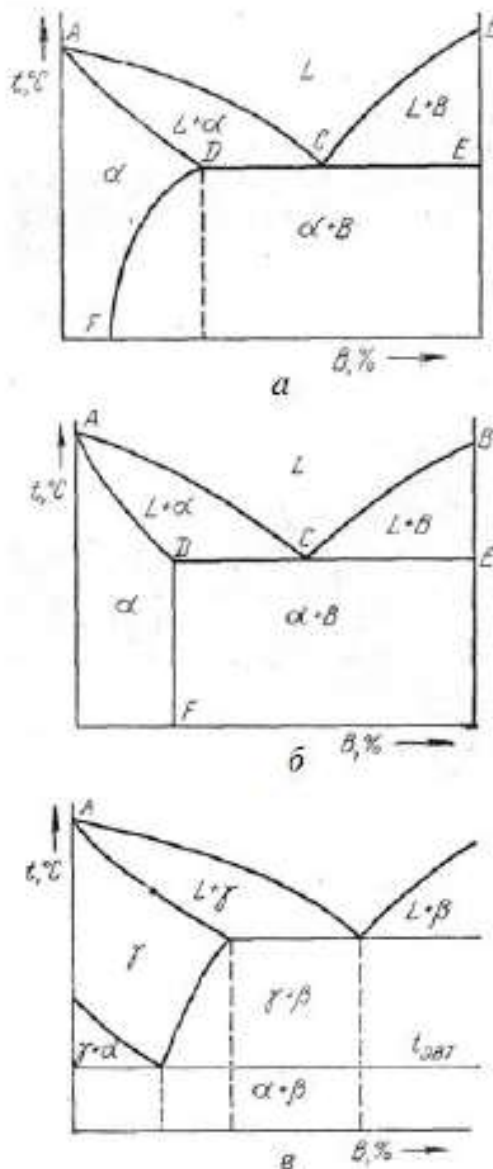


Рисунок 6 – Діаграми станів

твердому розчині), і загартування може призвести до фіксації пересиченого твердого розчину (третій пункт термічної обробки), а подальше нагрівання може викликати виділення надлишкової фази (четвертий пункт термічної обробки).

Кожний легувальний елемент позначається літерою: Н – нікель; Х – хром; К – кобальт; М – молібден; Г – марганець; Д – мідь; Р – бор; Б – ніобій; Ц – цирконій; С – кремній; П – фосфор; Ч – рідкоземельні метали; В – вольфрам; Т – титан; А – азот; Ф – ванадій; Ю – алюміній.

### 3. Діаграма стану системи залізо-вуглець

Залежно від вмісту вуглецю залізовуглецеві сплави поділяють на сталі (до 2 % С) і чавуни (більше 2 %). Діаграма стану системи Fe-C графічно зображує фазовий стан залізовуглецевих сплавів залежно від вмісту вуглецю та температури за умови дуже повільного їх охолодження або нагрівання. Основою для побудови такої діаграми (рис. 7) є дослідження Д. К. Чернова, пов'язані з відкриттям критичних температур (точок), що залежать від вмісту вуглецю у сплаві, а також уявлень щодо закономірності зміни при певних температурах структурного стану і властивостей залізовуглецевих сплавів. Діаграму Fe-C використовують у теорії та практиці термічної обробки сталей і чавунів.

Діаграма Fe-C показана лише для інтервалу концентрації вуглецю від 0 до 6,67 %, тобто до утворення хімічної сполуки  $\text{Fe}_3\text{C}$  (цементит). Лише ця частина має практичне значення, оскільки сплави з більш високим вмістом вуглецю дуже крихкі. По осі абсцис на діаграмі показано концентрацію вуглецю в масових частках (мас. %), а по осі ординат – температуру в градусах Цельсія (Т, °С). Якщо розглядати  $\text{Fe}_3\text{C}$  як компонент, то для переводу концентрації вуглецю в концентрацію цементиту вміст вуглецю слід помножити на 15.

При охолодженні залізовуглецевих сплавів вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти з залізом, утворюючи  $\text{Fe}_3\text{C}$ , але й виділятися у вільному стані у вигляді графіту. Тому розрізняють дві фази сплавів.

Основними фазами залізовуглецевих сплавів є рідкі та тверді розчини вуглецю у залізі, цементит та графіт. У розплаві заліза при температурі 1147 °С розчиняється до 4,3 % вуглецю. У твердих розчинах заліза (ферит, аустеніт) розчинність вуглецю значно менша.

Твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної гратки (ОЦК) заліза називають феритом (Ф). високотемпературний  $\delta$ -ферит містить максимальну кількість вуглецю – 0,1 %. У низькотемпературному  $\alpha$ -фериті максимальна розчинність вуглецю становить 0,025 % при 727 °С, а при зниженні температури зменшується практично до нуля. Ферит м'який (80...100 НВ), пластичний, нижче 768 °С магнітний.

Твердий розчин втілення вуглецю на основі гранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК)  $\gamma$ -заліза називають аустенітом (А). розчинність вуглецю в  $\gamma$ -залізі при зростанні температури підвищується і досягає максимуму (2,14 % С) при 1147 °С. Аустеніт пластичний, немагнітний, твердість його 170 НВ.

Хімічна сполука, яка утворюється в залізовуглецевих сплавах, карбід заліза  $\text{Fe}_3\text{C}$ , має назву цементит (Ц). Це найбільш тверда (780 НВ) і крихка фаза в системі залізо – вуглець, нижче 217 °С магнітна. Цементит містить 6,68 % С, має складну орторомбічну кристалічну ґратку з 12 атомами заліза і 4 атомами вуглецю, температура плавлення становить близько 1600 °С.

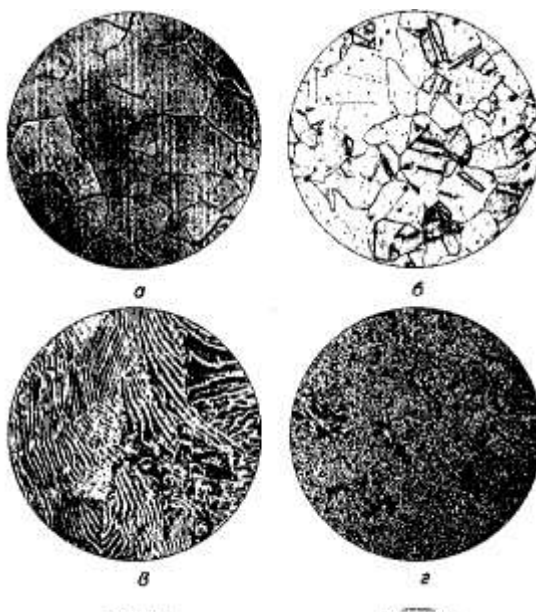


Рисунок 7 – Мікроструктури залізовуглецевих сплавів:

*a* – ферит,  $\times 200$ ; *б* – поліедри аустеніту,  $\times 100$ ; *в* – перліт пластинчастий,  $\times 200$ ;  
*г* – перліт зернистий,  $\times 200$ ; *д, е* – ледебурит,  $\times 350$

Евтектоїдна (механічна) суміш фериту та цементиту, яка утворюється при 727 °С і вмісті вуглецю 0,8 %, має назву перліт (П). Залежно від будови перліту змінюються і його властивості. Так, пластинчастий перліт біль твердий, крихкий та міцніший за зернистий (160...230 НВ;  $\sigma_{\text{в}} = 600\text{...}800$  МПа;  $\delta = 15\text{...}20$  %).

Евтектичну суміш аустеніту і цементиту (вище 727 °С) або перліту і цементиту (нижче 727 °С) називають ледебурит (Л). він утворюється при вмісті вуглецю 4,3 % за температури 1147 °С, твердий (800 НВ) і крихкий. Це – структурна складова білих чавунів.

У промислових чавунах основною структурною складовою є графіт. Це

одна з поліморфних модифікацій (різновидів) структурно вільного вуглецю з гексагональною кристалічною ґраткою. Твердість і міцність графіту низькі. У сірих чавунах він має вигляд пластин різної форми і розмірів, у ковкому – форму пластівців, у високоміцному – кулясту форму.

Лінії діаграми стану системи Fe - Fe<sub>3</sub>C (рис. 6) показують (визначають), за яких температур в залізовуглецевих сплавах відбуваються перетворення. Лінія ABCD, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів з різним вмістом вуглецю, називається лінією ліквідусу. Лінія ANIECF, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається лінією солідусу. GOS – лінія верхньої границі області рівноваги α- і γ-фаз. При охолодженні по цій лінії починається виділення α-фази (при нагріванні - γ-фази). SE – лінія початку перетворення аустеніту з утворенням цементиту при охолодженні (критичні точки A<sub>cm</sub>), при нагріванні сплаву критичні точки A<sub>cm</sub>. PQ – лінія початку виділення цементиту (третинного) при охолодженні або розчинення третинного цементиту при нагріванні.

Однофазні області δ-фериту, α-фериту та аустеніту обмежені відповідно лініями AN, GPQ і NIESG. Лінія HIB при перитектичній температурі 1499 °C характеризується наявністю трьох фаз: δ-фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Сплави по лінії ECF, що відповідає евтектичній температурі 1147 °C, складаються з рідини, аустеніту і цементиту. Сплави на лінії PSK, яка відповідає евтектоїдній температурі 727 °C, складаються з аустеніту, фериту і цементиту. При температурах 768 °C (лінія MO для сталі) і 210 °C (для чавуну) спостерігається магнітне перетворення відповідно фериту і цементиту.

Характерні точки на діаграмі відповідають певним температурам і концентраціям вуглецю (мас. %).

Точка А відповідає температурі плавлення (або тверднення) чистого заліза (1539 °C). Точка В вказує на вміст вуглецю (0,5 %) у рідкій фазі при перитектичній температурі (1499 °C). Точка Н відповідає граничній кількості вуглецю (0,1 %) у δ-фазі при перитектичній температурі. Точка І вказує на вміст вуглецю (0,16 %) в аустеніті, який перебуває в рівновазі з δ-фазою і рідиною при перитектичній температурі. Точка С вказує на вміст вуглецю (4,3 %) у рідкій фазі в стану рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147 °C). Точка Е відповідає 2,14 % С в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі. Точка S відповідає 0,8 % С в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит + цементит) при евтектоїдній температурі (727°C). Точка Р відповідає 0,02 % С – граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом

і цементитом при евтектоїдній температурі.

#### 4. Формування структури сталей.

Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяють у відповідності з діаграмою стану на доевтектоїдні (від 0,025 % до 0,8 % C), евтектоїдні (0,8 % C) і заевтектоїдні (більше 0,8 % і до 2,14 % C). Відповідно кристалізація сталей може проходити в один, два або три етапи. В температурному інтервалі між лініями НІВ та ІЕ кристалізується аустеніт. Подальше формування структури залежить від складу сталі. В евтектоїдній сталі аустеніт залишається стабільним при охолодженні до точки S. При охолодженні відносно цієї точки при постійній температурі відбувається евтектоїдне перетворення. В результаті утворюється структура, що складається з суміші зерен (пластин)  $\alpha$ -фериту і цементиту. Таку евтектоїдну суміш називають перлітом.

При охолодженні доевтектоїдної сталі нижче лінії GS аустеніт втрачає стабільність і починається поліморфне перетворення його у ферит. Кристали фериту утворюються переважно на стиках зерен аустеніту і ростуть здебільшого у вигляді рівноважних зерен. Перетворення супроводжується зміною складу аустеніту відповідно лінії GS. При евтектоїдній температурі 727 °C аустеніт завжди набуває евтектоїдної концентрації. При деякому переохолодженні відбувається евтектоїдне перетворення.

Таким чином, структура доевтектоїдної сталі буде складатись з фериту та перліту.

У заевтектоїдній сталі нижче лінії ES аустеніт стає пересиченим щодо вуглецю. Надлишковий вуглець виділяється з аустеніту у вигляді вторинного цементиту по границях аустенітних зерен. Під час охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніт збагачується вуглецем відповідно лінії ES. Як і в доевтектоїдній сталі, аустеніт при евтектоїдній температурі матиме евтектоїдну концентрацію вуглецю і при подальшому охолодженні за постійної температури перетвориться на перліт. Структура заевтектоїдної сталі складається з перліту і вторинного цементиту. Перетворення при нагріванні сталей відбувається у зворотньому порядку.

##### *Формування структури білих чавунів*

У білих чавунах весь надлишковий вуглець перебуває у зв'язаному стані, тобто у вигляді цементиту -  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Структура чавуну формується за умов не дуже повільного охолодження розплаву у відповідності з метастабільною діаграмою системи залізо-цементит.

Розглянемо формування структури до евтектичного чавуну. Його кристалізація відбувається у два етапи. В інтервалі температур від лінії ліквідус до солідуса кристалізується аустеніт. При цьому склад рідкої фази змінюється відповідно нахилу лінії ВС діаграми, тобто розплав збагачується вуглецем. При евтектичній температурі концентрація рідкої фази буде відповідно точці С, тобто буде евтектичною. Евтектичний розплав, при деякому переохолодженні відносно евтектичної температури (1147 °С), кристалізується в евтектику, яка складається з суміші аустеніту і цементиту (ледебурит). Провідною фазою під час евтектичної кристалізації є цементит, пластини якого пересікаються гілками аустеніту. По закінченні кристалізації структура чавуну складається з аустеніту та ледебуриту.

При подальшому охолодженні в інтервалі температур від 1147 °С до 727 °С аустеніт збіднюється вуглецем відповідно до лінії ES діаграми. З нього виділяється вторинний цементит, який може нашаровуватись на цементит ледебуриту, утворювати приграничну сітку або пластини. Здебільшого вторинний цементит у чавуні не є самостійною структурною складовою. При переохолодженні відносно евтектоїдної лінії діаграми аустеніт складу точки S перетворюється на евтектоїд – перліт. Таким чином структура до евтектичного білого чавуну буде складатись з перліту та ледебуриту. Оскільки у ледебуриті аустеніт також перетворився на перліт, такий ледебурит інколи називають видозміненим. Користуючись діаграмою, неважко визначити, що структура евтектичного чавуну після повного охолодження являє собою ледебурит (видозмінений), а заевтектичного складається з первинного цементиту та ледебуриту.

## **5. Конструкційні та інструментальні сталі. чавуни.**

### **ВУГЛЕЦЕВІ СТАЛІ.**

Залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю від 0,025 до 2,14 % називають сталями. Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяють на:

- низьковуглецеві (до 0,25 % С);
- середньовуглецеві (0,25...0,6 % С);
- високовуглецеві (більше 0,6 % С).

За структурою у рівноважному стані їх поділяють на:

- доевтектоїдні;
- евтектоїдні;
- заевтектоїдні.

Доевтектоїдні сталі (від 0,025 до 0,8 % С) мають структуру, яка складається з зерен фериту і перліту (ферит+цементит). Зі зростанням вмісту вуглецю зменшується кількість фериту і зростає кількість перліту. Евтектоїдна сталь містить 0,8 % С і структура її складається лише з перліту пластинчастої будови. Заевтектоїдні сталі (0,8...2,14 % С) мають структуру перліту, по границях зерен якого розташований надлишковий цементит.

За призначенням та якістю розрізняють такі групи:

- вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості та якісні. Якісні вуглецеві конструкційні сталі, в свою чергу, розділяють на будівельні (низьковуглецеві) та машинобудівельні (середньо- та низьковуглецеві);
- вуглецеві інструментальні якісні та високоякісні сталі.

Марки, хімічний склад і властивості сталей встановлюють відповідними державними стандартами. Вуглецеву конструкційну сталь звичайної якості по ГОСТ 380-88 розділяють на групи сталей, які постачаються:

А – з гарантованими механічними властивостями;

Б – з гарантованим хімічним складом;

В – з гарантованими механічними властивостями і з окремими вимогами щодо хімічного складу.

Конструкційну сталь звичайної якості групи А позначають Ст.0, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4, Ст.5, Ст.6. Цифри (умовний номер марки) вказують на середній вміст вуглецю у десятих долях відсотка. Чим більше цифра, тим вище вміст вуглецю. Ці сталі виплавляють в конвертерах або мартенівських печах.

Для сталей групи Б вказують спосіб виробництва літерами М, Б чи К (мартенівський, бесемерівський чи конвертерний). Наприклад, МСт.0, МСт.1, БСт.0, КСт.1 і т.д.

Сталь групи В виготовляють в мартенівських печах і конвертерах і позначають ВМСт.1, ВКСт.2, ВКСт.3 та т.д.

З гарячекатаної сталі групи А виготовляють деталі машин і механізмів механічною обробкою, не піддаючи попередньо гарячій обробці (куванню, штамповці, зварюванню).

Сталь групи Б призначена для виготовлення деталей гарячою обробкою (куванням, штамповою і т.д.).

Зі сталі групи В виготовляють вузли машин та механізмів зварюванням. Сталі підвищеної якості (групи В) використовують, головним чином, у мостосуднобудуванні.

Вуглецеву конструкційну якісну сталь розділяють на дві групи: з нормальним вмістом марганцю, з підвищеним вмістом марганцю. Сталі першої

групи позначають 08, 10, 15, 20, ..., 85. Цифри показують середній вміст вуглецю в сталі в сотих долях відсотка. Наприклад, сталь 30 містить 0,27...0,35 % С. Сталі другої групи з підвищеним вмістом (до 1,2 %) марганцю позначають 15Г, 20Г, ..., 70Г (буква Г вказує на підвищений вміст марганцю).

Конструкційні якісні вуглецеві сталі одержують в основних конвертерах, мартенівських та електричних печах.

Сталі першої групи 08, 10, 15 і 20 використовують для мало навантажених деталей і елементів зварних, кованих, штампованих конструкцій; сталі 25, 30, 35, 40 і 45 – для виготовлення деталей, що зазнають помірних напружень; сталі 50, 55, 60, 65 і 70 – для виготовлення деталей підвищеної міцності.

Вуглецева інструментальна якісна сталь позначається У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13. Літера У означає „сталь вуглецева інструментальна”, а цифра – середній вміст вуглецю в десятих долях відсотка. З цих сталей виготовляють ріжучий, вимірювальний і штамповий інструмент, який має високу твердість і міцність після термічної обробки.

Вуглецеву інструментальну високоякісну сталь позначають, як і якісну, з додаванням букви А: У7А, У8А, У9А і т.д. Високоякісна сталь містить менше сірки та фосфору, а також неметалевих включень, має вищі механічні властивості. Витоплюють високоякісну вуглецеву інструментальну сталь в електродугових та кислих мартенівських печах, а також в основних мартенівських печах.

#### ЛЕГОВАНІ СТАЛІ.

Легуючі компоненти входять до сталі для надання їй спеціальних властивостей. До легуючих компонентів відносяться Cr, Ni, W, Mo, V, Cu, Al, Nb, Mn, B, Co тощо. Крім того, для зменшення газонасиченості сталі і вмісту сірки використовують лігатуру (допоміжні сплави) рідкоземельних металів, яка складається з 50 % церію, 25 % лантану, 15 % неодиму і 10 % інших рідкоземельних елементів.

Сталі, до складу яких вводять один або кілька легуючих компонентів для надання їм потрібних властивостей, називають спеціальними або легованими.

Залежно від того, яким компонентом сталь легована, її називають хромовою, нікелевою, ванадієвою тощо. Якщо сталь легована кількома компонентами, її називають хромонікелевою, хромомарганцевою, хромонікельвольфрамовою тощо.

Основна мета легування – зміна будови і фізико-механічних властивостей сталі (твердості, міцності, опору зносу і корозії), надання їй особливих фізичних і хімічних властивостей – здатність служити в умовах високих і

низьких температур, високого і низького тиску, різного агресивного середовища і т.д. Переваги легованої сталі найбільшою мірою виявляються після її термічної обробки.

Властивості сталі залежать від кількості легуючих елементів і їх взаємодії з вуглецем і залізом. Легуючі компоненти утворюють з залізом тверді розчини і хімічні сполуки. Нікель і кобальт утворюють розчини заміщення з необмеженою розчинністю, решта елементів – з обмеженою розчинністю. Якщо вони присутні у кількостях, що перевищують границю розчинності, їх надлишок утворює з залізом хімічні сполуки (наприклад,  $\text{FeCr}$ ,  $\text{FeV}$ ,  $\text{Fe}_3\text{W}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{Mo}_2$  тощо). При утворенні твердих розчинів змінюються всі властивості сталі, особливо фізичні і механічні, при утворенні хімічних сполук – тільки механічні властивості сталі. Всі легуючі компоненти зміщують критичні точки  $A_3$  (910 °C) і  $A_4$  (1401 °C), зв'язані з алотропічними перетвореннями Fe. Їх можна розділити на дві нерівні групи:

- Ni, Pt, Mn, що знижують точку  $A_3$  і підвищують точку  $A_4$  і ділянка стабільного існування аустеніту розширюється, а ділянка стабільного існування фериту звужується;
- Cr, W, Mo, Al, Si, V, Ti та інші компоненти підвищують точку  $A_3$  і знижують точку  $A_4$ .

Перша група легуючих компонентів знижує точку евтектоїдного перетворення  $A_1$ , а друга підвищує її. Всі легуючі компоненти, крім марганцю, при нагріванні затримують ріст зерен аустеніту, що дозволяє піддавати леговані сталі обробці тиском у більш широкому інтервалі температур, не побоюючись перегріву. Mn, Si, Ni, W, Mo, Cr та інші легуючі компоненти підвищують границю міцності і твердість; Ni, V, Co підвищують в'язкість; Mn, Ni, Cr посилюють опір стиранню; Ni, Cr, Cu, Si, Mo та інші елементи підвищують корозійну стійкість.

#### *Класифікація легованих сталей.*

Леговані сталі класифікують за призначенням, хімічним складом, структурою, вмістом легуючих компонентів та іншими ознаками.

За призначенням леговані сталі ділять на три групи:

- конструкційні, призначені для виготовлення деталей машин і елементів конструкцій;
- інструментальні – для виготовлення ріжучого, штампового, вимірювального та іншого інструмента;
- сталі і сплави з особливими властивостями – нержавіючі, жароміцні, теплостійкі та інші.

За хімічним складом класифікація здійснюється так, що умовне позначення показує приблизний хімічний склад сталі.

Легуючі елементи позначають українськими літерами:

А – азот,  
 Б - ніобій,  
 В – вольфрам,  
 Г – марганець,  
 Д – мідь,  
 К – кобальт,  
 М – молібден,  
 Н – нікель,  
 П – фосфор,  
 Р – бор,  
 С – кремній,  
 Т- титан,  
 Ф – ванадій,  
 Х – хром,  
 Ц – цирконій,  
 Ч – рідко земельні метали,  
 Ю – алюміній.

Наприклад, 20ХГ – хромомарганцева сталь, що містить  $\approx 0,20\%$  С,  $1\%$  Мп,  $1\%$  Сг; 35Х2МА – високоякісна (буква А в кінці марки вказує на знижений вміст шкідливих домішок, а в середині марки – на вміст азоту в сталі) хромомолібденова сталь, яка містить  $\approx 0,35\%$  С,  $2\%$  Сг і  $1\%$  Мо.

За структурою в відпаленому стані леговані сталі розділяють на  
 доевтектоїдні (Ф+П);  
 евтектоїдні (П)<sub>4</sub>;  
 заевтектоїдні (П+Ц<sub>2</sub>);  
 ледебуритні (Л).

За структурою в нормалізованому стані сталі поділяють на:

перлітні при вмісті легуючих компонентів до  $5\%$ ;  
 мартенситні при вмісті легуючих компонентів до  $15\%$ ;  
 аустенітні при вмісті легуючих компонентів до  $20\ldots 30\%$  (головним чином Ні та Мп).

Найпоширеніші леговані сталі доевтектоїдного, евтектоїдного і перлітного класів (це низько- і середньо леговані конструкційні і інструментальні сталі). Сталі мартенситного, аустенітного, заевтектоїдного і ледебуритного класів –

високолеговані.

За вмістом легуючих компонентів сталі поділяють на:

- низьколеговані (до 2,5 % легуючих компонентів);
- середньо леговані (2,5...10 % легуючих компонентів);
- високолеговані (понад 10 % легуючих компонентів).

*Конструкційні леговані сталі.*

Конструкційними називають сталі, які застосовуються для виготовлення деталей машин (машинобудівельні сталі), конструкцій і споруд (будівельні сталі). До конструкційних сталей відносять також сталі зі спеціальними властивостями – зносостійкі, корозійностійкі, жаростійкі, жароміцні тощо.

Конструкції та деталі машин працюють за умов високих динамічних навантажень, високих концентрацій напружень, високих та низьких температур. Ці фактори призводять до крихкого руйнування, що значно знижує надійність конструкцій та машин.

Конструкційні сталі повинні мати високу границю текучості  $\sigma_{0,2}$  в поєднанні з високою пластичністю ( $\delta$ ,  $\psi$ ), опором крихкому руйнуванню, низьким порогом холодноламкості. Довговічність роботи конструкцій і машин залежить від опору втомлюваності, зносу, корозії сталі. Всі наведені характеристики визначають конструкційну міцність сталі. Міцність сталі підвищують зміцненням шляхом термічної, термомеханічної, хіміко-термічної та деформаційної обробок, добором хімічного складу. Конструкційна сталь повинна мати добрі технологічні властивості: оброблюваність тиском (прокатка, кування, штампова і т.д.) і різання, малу схильність до знеуглецювання, деформацій і тріщиноутворення при відпалі тощо. Будівельні конструкційні сталі, крім того, повинні добре зварюватись.

Конструкційні леговані сталі поділяють на:

- сталі для цементації;
- поліпшувальні;
- високоміцні.

Сталі для цементації використовують для виробів, які працюють за умов тертя, ударних і перемінних навантажень. Надійність і ресурс роботи таких виробів забезпечується конструктивною міцністю і в'язкістю серцевини металу. Для цього сталі, призначені для цементації, насичують з поверхні вуглецем (цементують) і далі піддають гартуванню з низьким відпуском, що забезпечує високу твердість (58...63 HRC) поверхні деталі і потрібну в'язкість серцевини. Хімічний склад таких сталей обмежений вмістом вуглецю до 0,25 %, сумарним вмістом легуючих компонентів для низьколегованих сталей до 2,5 % і для

середньолегованих – 2,5...10 %. Для виробів малих розмірів, що працюють за умов тертя і середніх навантажень, використовують сталі типу 15ХА, 20Х. Відповідальні деталі для експлуатації при високих і ударних навантаженнях і великих швидкостях виготовляються зі сталей типу 15ХФ, 18ХГ, 25ХГМ. Типовий режим термічної обробки після цементації – гартування з низьким відпуском для одержання структури мартенситу.

Поліпшувані сталі – це низьколеговані сталі з вмістом вуглецю 0,3...0,5 %. Для забезпечення потрібних властивостей міцності, пластичності та в'язкості їх піддають гартуванню з високим відпуском (500...600 °С), тобто поліпшують. Загальна кількість легуючих компонентів у поліпшуваних сталях становить 3...5 %, основний легуючий елемент – хром (0,8...1,1 %).

Розрізняють хромисті сталі – 40Х, 45Х, для прогартованості їх додатково легують бором 0,002...0,003 % (40ХР) або до 1 % марганцем (40ХГ). З них виготовляють деталі для роботи за умов підвищених напружень і знакозмінних навантажень – шатуни, колінчасті вали.

Хромомарганцеві сталі, леговані Si та Mn (хромансил), наприклад 30ХГС, добре зварюються.

Для великих відповідальних і важконавантажуваних деталей складної форми використовують сталі зі значною кількістю Ni та Mo, наприклад 40ХНМ, 30ХН2МФ, 40ХН2МФ, 40ХН2МА тощо.

Високоміцні леговані сталі використовують для виготовлення особливо відповідальних і важконавантажених деталей, які експлуатують за умов різко змінюваних навантажень (деталі шасі, конструкції фюзеляжів тощо). Це комплексно-леговані середньо вуглецеві сталі (0,3...0,6 % С), які зміцнюють термічною обробкою або піддають термомеханічній обробці. Наприклад, 30ХГСН2А, 40ХГСН3ВА.

*Сталі зі спеціальними властивостями.*

Спеціальні леговані сталі – це високолеговані сталі з явно вираженими особливими властивостями (корозійна стійкість, жаростійкість, жароміцність тощо).

Неіржавіючі або корозійностійкі сталі володіють високою хімічною стійкістю в агресивних середовищах. Одержують їх введенням до складу низько- і середньо вуглецевих сталей значної кількості хрому (не менше 12,5 %) і нікелю, а також додатково титану, алюмінію і марганцю. Найпоширеніші хромисті і хромонікелеві сталі.

Залежно від структури розрізняють

корозійностійкі сталі аустенітні (12Х18Н9, 12Х18Н10, 04Х18Н10,

10X14Г14НЗ),  
 феритні (12X17, 08X17Т),  
 мартенситні (40X13),  
 аустенітно-мартенситні (09X15Н18Ю)  
 аустенітно-феритні (08X21Н6М2Т).

Широко їх застосовують у харчовій, нафтопереробній галузях промисловості, а також у транспортному машинобудуванні і будівництві. Розроблено також високолеговані сталі для агресивних середовищ (80 % розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) зі складною системою легування елементами Cr, N, Mo, Cu.

Жаростійкі (жаровиностійкі) сталі – це такі, що здатні чинити опір корозійному руйнуванню під дією повітря або газового середовища при високих температурах (400...900 °C).

Жаростійкі сталі містять у своєму складі Al, Cr, Si і не утворюють жаровини. Стійкість таких сталей зумовлено утворенням на поверхні виробів щільних захисних плівок оксидів вказаних легуючих елементів.

Так, для виробів з робочими температурами до 850...900 °C (клапани двигунів внутрішнього згорання) використовують сталі 40X9C2, 08X17Т;

для температур до 1100 °C (сопла, жарові труби газових турбін) – сталі типу 36X18Н25C2.

Хромиста сталь з 30 % Cr стійка до температури 1200 °C.

Жароміцні сталі – це такі, що забезпечують здатність виготовлених з них виробів витримувати механічні навантаження без деформації й руйнування за високих температур (500...1000 °C). Вони містять у своєму складі хром, кремній, нікель, молібден та інші елементи. Залежно від призначення розрізняють клапанні сталі, котлотурбінні, газотурбінні сталі, а також сплави з високою жароміцністю.

Для температур 300...500 °C використовують Cr-Si-сталі мартенситного класу (сільхроми) типу 40X9C2, 40X10C2М. З них виготовляють клапани двигунів автомобілів і тракторів.

Високолеговані аустенітні сталі типу 17X18Н9 (гомогенні) або 45X14Н14В2М (гетерогенні – з дрібними карбідними або інтерметалідними фазами) використовують за температур 600...900 °C. Аустенітні сталі досить міцні, але в'язкі і погано обробляються різанням. З них виготовляють парові котли, лопатки газових турбін, сопла реактивних двигунів тощо.

Для більш високих температур (800...1000 °C) використовують хромонікелеві сплави - ніхроми і німоніки з мінімальним вмістом вуглецю (0,06...0,12 % C). Вони містять більше 55 % Ni і переважають за властивостями

кращі жароміцні сталі.

За структурою їх поділяють на гомогенні (ніхроми ХН60Ю, ХН78Т та інші) і гетерогенні (німоніки ХН77ТЮ, ХН77ТЮР тощо), леговані, окрім хрому, ще й елементами, які утворюють з нікелем дисперсні інтерметалідні зміцнюючі фази типу  $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr})_3\text{Ti}$ ,  $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr})_3\text{Al}$  тощо. Маркування нікелевих сплавів здійснюють літерами, які означають елементи, і цифрами, що вказують на вміст нікелю. Так, сплав ХН70ВМТЮ містить 70 % Ni, а також Cr, W, Mo, Ti, Al.

Жароміцні сплави на основі кобальту використовують обмежено, наприклад для лопаток соплового апарата реактивних двигунів.