

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних та контрольних робіт з дисципліни

“Металознавство”

для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство»
денної та заочної форм навчання

II частина

2023

Методичні вказівки до лабораторних та контрольних робіт з дисципліни «Металознавство» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» денної та заочної форм навчання (II частина) / Укл.: Л.П. Степанова, Ю.І. Кононенко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023, – 61с.

Укладачі: Л.П. Степанова, к.т.н., доц.
Ю.І. Кононенко, ст. викл.

Рецензент: В.Ю. Ольшанецький, д.т.н., проф.

Відповідальний за випуск: В.Ю. Ольшанецький, д.т.н., проф.

Рекомендовано
до видання НМК інженерно-
фізичного факультету
Протокол №8
від «11» квітня

Затверджено
на засіданні кафедри
Фізичне матеріалознавство
Протокол № 6
від 02 березня 2023 р.

ЗМІСТ

ЧАСТИНА II

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 Залізовуглецеві сплави.

Мікроскопічне дослідження відпалених вуглецевих сталей.....	76
7.1 Загальні відомості з теорії.....	76
7.1.1 Компоненти, фази та структурні складові залізовуглецевих сплавів.....	76
7.1.2 Метастабільна діаграма Fe-Fe ₃ C.....	79
7.1.3 Вуглецеві сталі.....	81
7.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	87
7.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	87
7.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	87
7.5 Вказівки з техніки безпеки.....	88
7.6 Порядок виконання роботи.....	88
7.7 Зміст звіту.....	88
7.8 Література.....	89

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 Вивчення особливостей

мікроструктур сталей.....	90
8.1 Загальні відомості з теорії.....	90
8.1.1 Відманштеттова структура.....	90
8.1.2 Анормальна структура.....	91
8.1.3 Смугаста структура.....	92
8.1.4 Зневуглецювання.....	93
8.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	93
8.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	93
8.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	94
8.5 Вказівки з техніки безпеки.....	94
8.6 Порядок виконання роботи.....	94
8.7 Зміст звіту.....	94
8.8 Література.....	94

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9 Вивчення структури та властивостей чавунів.....	95
9.1 Загальні відомості з теорії.....	95
9.1.1 Класифікація чавунів.....	95
9.1.2 Фази та структурні складові чавунів.....	95
9.1.3 Білий чавун.....	96
9.1.4 Сірий чавун.....	97
9.1.5 Вибілений чавун.....	101
9.1.6 Високоміцний чавун.....	101
9.1.7 Чавун з вермікулярним графітом.....	103
9.1.8 Ковкий чавун.....	103
9.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	107
9.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	107
9.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	108
9.5 Вказівки з техніки безпеки.....	108
9.6 Порядок виконання роботи.....	108
9.7 Зміст звіту.....	109
9.8 Література.....	109
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10 Вивчення структури, властивостей та призначення легованих сталей.....	110
10.1 Загальні відомості з теорії.....	110
10.1.1 Вплив легувальних елементів на структуру та властивості сталі.....	111
10.1.2 Маркування легованих сталей.....	115
10.1.3 Класифікація легованих сталей.....	116
10.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	119
10.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи.....	119
10.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання.....	120
10.5 Вказівки з техніки безпеки.....	120
10.6 Порядок виконання роботи.....	120
10.7 Зміст звіту.....	120
10.8 Література.....	120
ПРИКЛАД ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ «МЕТАЛОЗНАВСТВО».....	121

ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ.....	123
ЛІТЕРАТУРА.....	130
ДОДАТОК А Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт із дисципліни «Металознавство» в лабораторіях кафедри фізичного матеріалознавства.....	131

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. МІКРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДПАЛЕНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи: вивчити фазові та структурні перетворення в сплавах системи Fe-Fe₃C в залежності від їх хімічного складу та температури. Визначити вплив вуглецю на структуру і властивості сталей; засвоїти принципи маркування сталей та їх вибір для деталей та інструментів.

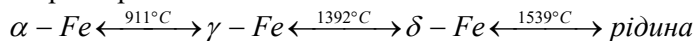
7.1 Загальні відомості з теорії

Серед металевих матеріалів в машинобудуванні найбільш широко використовуються сплави заліза з вуглецем – сталі та чавуни (90% від загальної кількості). Визначити структуру цих сплавів в стані рівноваги, температури фазових перетворень та вибрати температуру термічної обробки дозволяє діаграма стану “залізо-цементит” (Fe-Fe₃C) (рис. 7.1).

7.1.1 Компоненти, фази та структурні складові залізобуглецевих сплавів

Компоненти – хімічні елементи, що входять до складу сплавів. У випадку системи, що вивчається, компонентами є залізо та вуглець.

Залізо – перехідний метал з температурою плавлення 1539°C. Атомний радіус 0,127 нм. Залізо поліморфний метал. У чистому залізі при температурах 911°C (т. G) та 1392°C (т. N) відбуваються поліморфні перетворення:



Нижче 911°C та в інтервалі 1392-1539°C залізо має ОЦК ґратку з параметром 0,286нм при 20°C, компактність ґратки - 68%. Низькотемпературна модифікація позначається α -Fe, а високотемпературна – δ -Fe. В інтервалі температур 911-1392°C існує γ -Fe з ГЦК ґраткою, параметр якої 0,3645нм, компактність ґратки – 74%.

Між атомами заліза існує металевий тип зв'язку. Нижче 768°C α -Fe феромагнітне, а вище – парамагнітне. Ця температура називається точкою Кюрі.

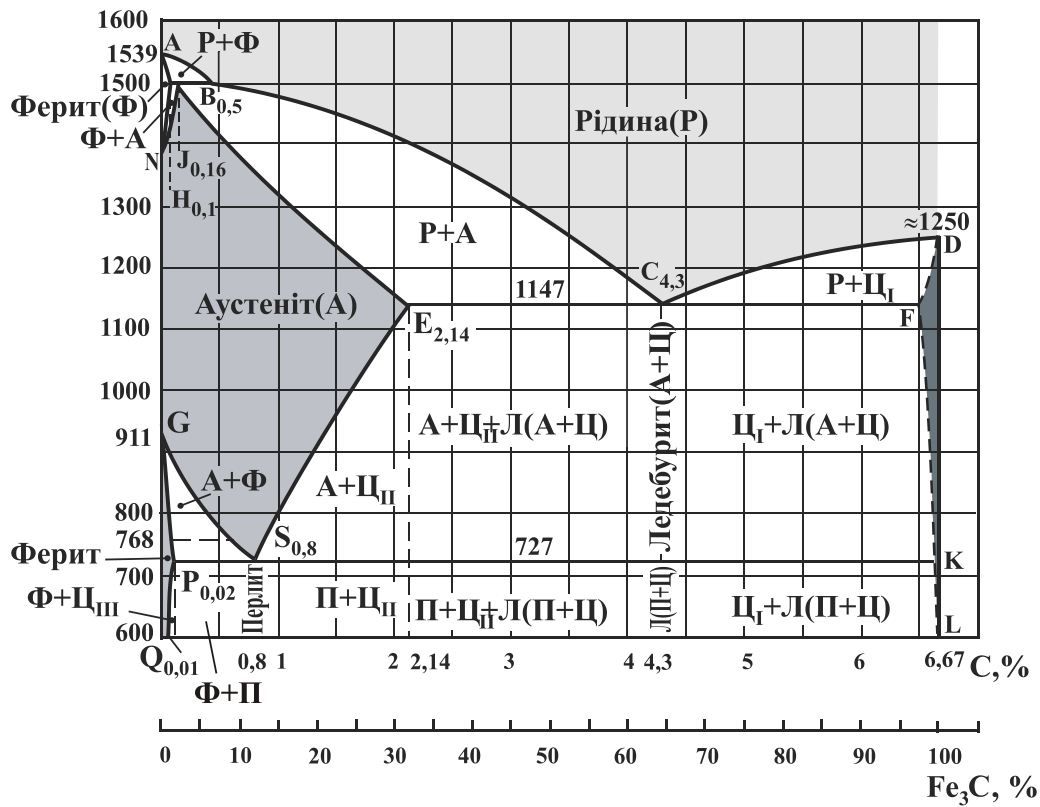


Рисунок 7.1 – Метастабільна діаграма Fe-Fe₃C

Залізо характеризується низькими значеннями міцності, твердості та високою пластичністю ($\sigma_B=150-200\text{МПа}$, $\delta\geq 60\%$, НВ60-70).

Вуглець – неметал, з температурою плавлення 3500°C та атомним радіусом $0,077\text{нм}$; має в звичайних умовах складну гексагональну ґратку – модифікація графіт, за умови високого тиску існує у вигляді алмазу.

В системі “залізо-вуглець” розрізняють такі фази: рідкий розчин (Р), ферит (Ф), аустеніт (А), цементит (Ц) і графіт (Г).

Ферит – твердий розчин втілення атомів вуглецю в ОЦК ґратці заліза. Розрізняють низькотемпературний α -ферит з граничною розчинністю вуглецю $0,02\%$ при 727°C , та високотемпературний δ -ферит ($0,1\%$ С при 1499°C). Низька розчинність вуглецю у фериті зумовлена малим радіусом порожнин в ОЦК ґратці ($0,037\text{нм}$). Механічні властивості фериту наближаються до властивостей чистого заліза: $\sigma_B=200...250\text{МПа}$, $\delta=40...50\%$, НВ=80...100. У мікроструктурі ферит виявляється у вигляді світлих поліедричних зерен.

Аустеніт – твердий розчин втілення вуглецю та інших елементів в γ -Fe. В ГЦК ґратці радіус міжатомних порожнин дорівнює $0,052\text{нм}$. Цим зумовлена підвищена, порівняно з феритом, розчинність вуглецю в аустеніті – $2,14\%$ при 1147°C . Аустеніт має такі механічні властивості: $\delta=50...60\%$, НВ=160...200, фаза м’яка, парамагнітна.

Тверді розчини втілення, крім вуглецю, можуть утворювати азот, кисень, водень, частково бор; тверді розчини заміщення – кремній, хром, нікель і інші метали.

Цементит – хімічна сполука заліза з вуглецем (Fe_3C), містить $6,67\%$ С. Ґратка складна ромбічна, характеризується металевим зв’язком між атомами заліза та іонним зв’язком між атомами вуглецю та заліза. Тому цементит має високу твердість (НВ ≥ 800), крихкість і практично нульову пластичність. Цементит – метастабільна фаза. Температура плавлення точно не встановлена і становить приблизно 1250°C . До температури 210°C (точка Кюрі) цементит феромагнітний. При дуже повільному охолодженні замість нього може утворюватися графіт у сплавах із підвищеним вмістом вуглецю ($> 2,14\%$).

Графіт – стабільна модифікація вуглецю, має гексагональну складну кристалічну ґратку. Відстань між атомами в одному шарі складає $0,1415\text{нм}$, між шарами значно більше – $0,34\text{нм}$. У першому

випадку зв'язок реалізується за рахунок ковалентних сил, в іншому - за рахунок слабких сил Ван-дер-Ваальса. Густина графіту - $2,26 \text{ г/см}^3$, твердість - $3 \dots 5 \text{ НВ}$, він має значну крихкість, пластичність практично відсутня.

Ферит, аустеніт, цементит можуть існувати в сплавах у структурно вільному вигляді або входити до складу ледебуриту чи перліту.

Ледебурит – евтектична фазова суміш цементиту та аустеніту в інтервалі температур $1147-727^\circ\text{C}$, перліту і цементиту при температурах нижче 727°C .

Евтектичний сплав з $4,3\% \text{C}$ має структуру ледебуриту, що містить 64% цементиту (за масою) і 36% фериту, тому ледебурит твердий та крихкий ($\text{HB} \geq 600 \text{ МПа}$, $\delta \approx 0\%$). Утворюється в сплавах ($> 2,14\% \text{C}$).

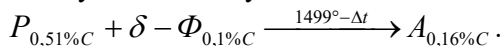
Перліт – евтектоїдна фазова суміш фериту та цементиту, що містить $0,8\% \text{C}$. Властивості перліту залежать від дисперсності ферито-цементитної суміші та форми частинок цементиту. Грубоголчастий перліт має властивості $\sigma_{\text{B}} = 500 \dots 900 \text{ МПа}$, $\delta = 8 \dots 15\%$, $\text{HB} = 160 \dots 250$. Перліт, що утворений більш дисперсною ферито-цементитною сумішшю має більшу міцність та меншу пластичність.

7.1.2 Метастабільна діаграма Fe-Fe₃C

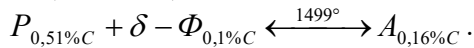
Складність діаграми Fe-Fe₃C (рис. 7.1) зумовлена тим, що в сплавах Fe-C, крім первинної кристалізації (рідина – тверда фаза) проходять процеси вторинної кристалізації в твердому стані, які пов'язані з поліморфними перетвореннями заліза та зменшенням розчинності вуглецю у фериті та аустеніті.

Початок кристалізації всіх сплавів відбувається при температурах лінії ліквідусу ABCD (AB – початок кристалізації високотемпературного фериту, BC – аустеніту, CD – цементиту). Первинна кристалізація завершується при досягненні температур лінії солідусу AHJECF.

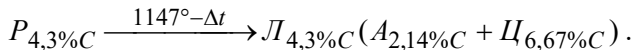
HJB – лінія утворення аустеніту за перитектичною реакцією, коли внаслідок взаємодії рідини складу точки B з δ -феритом складу точки H, утворюється аустеніт складу точки J:



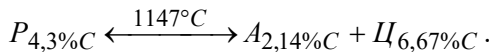
Перитектичне перетворення спостерігається у сплавах з вмістом вуглецю $0,1\% < C < 0,51\%$. При температурі 1499°C в рівновазі знаходяться три фази (P, Φ та A):



ESF – лінія евтектичного перетворення. При деякому переохолодженні нижче 1147°C із рідини складу точки С одночасно кристалізується аустеніт та цементит, утворюючи евтектичну фазову суміш, яка називається ледебуритом:

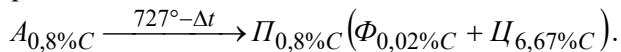


Евтектичне перетворення відбувається у сплавах з вмістом вуглецю $2,14\% < C < 6,67\%$. При температурі 1147°C спостерігається нонваріантна рівновага ($c=0$). В рівновазі знаходяться три фази (P, A, Ц):

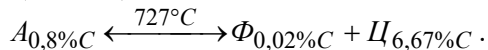


Нижче лінії солідус при охолодженні в сплавах відбувається ряд фазових перетворень.

PSK – лінія евтектоїдного перетворення. У твердому стані, при деякому переохолодженні нижче 727°C , із аустеніту складу точки S одночасно утворюються ферит та цементит. Ця фазова суміш називається перлітом:



Евтектоїдне перетворення спостерігається у сплавах із вмістом вуглецю $0,02\% < C < 6,67\%$. При температурі 727°C існує нонваріантна рівновага трьох фаз (A, Ц, Φ):



У евтектичному сплаві із вмістом $4,3\%C$, який має структуру ледебуриту, при охолодженні нижче температури 727°C аустеніт ледебуриту відповідно до евтектоїдної реакції перетворюється у перліт.

В структурі сплавів з $2,14\% < C < 6,67\%$ присутня евтектична складова – ледебурит, який при температурі від 1147°C до евтектоїдної складається із аустеніту та цементиту, а нижче 727°C – із перліту та аустеніту.

У сплавах із концентрацію вуглецю $0,1\% < C < 0,16\%$ високотемпературний δ -ферит перетворюється в аустеніт в інтервалі температур між лініями NH і HJ. Поліморфне перетворення аустеніту у ферит при охолодженні у низькотемпературній області відбувається за лінією GS і GP (відповідно початок та кінець). В сплавах $0,16\% < C < 0,51\%$ поліморфні перетворення відбувається при постійній температурі 1499°C . У сплавах з $0,02\% < C < 0,8\%$ поліморфне перетворення здійснюються в інтервалі температур від лінії GS до PSK. У сплавах з $C \geq 0,8\%$ перетворення аустеніту у ферит спостерігається при постійній температурі 727°C .

Лінії ES і PQ (сольвуси) вказують на зменшення розчинності вуглецю відповідно в аустеніті та фериті, з пониженням температури. Тому при охолодженні нижче температур лінії ES із аустеніту виділяється цементит вторинний (Ц_{II}); нижче лінії PQ із фериту – цементит третинний (Ц_{III}); Ц_{II} і Ц_{III} не відрізняються за властивостями від цементиту первинного (Ц_{I}), що кристалізується із рідини за лінією CD, просто існують в різних температурних інтервалах. Вміст вуглецю в т.Q при температурі 600°C складає $0,01\%$, а при 20°C – $0,006\%$.

Структурні складові у твердому стані: Ф, А, Ц, П та Л. Фазовий склад залізовуглецевих сплавів: Р, Ф, А та Ц.

В залежності від вмісту вуглецю всі залізовуглецеві сплави поділяють на сталі та чавуни.

7.1.3 Вуглецеві сталі

Сталі – сплави заліза з вуглецем, що містять до $2,14\% \text{C}$, а також корисні домішки Mn, Si і шкідливі домішки P, S, O_2 , H_2 , N. Від концентрації вуглецю в сталі залежать її структура, властивості та призначення.

Кремній (до $0,4\%$) та марганець (до $0,8\%$) є корисними домішками в сталях. Вони розкислюють сталь, тобто з'єднуючись із киснем оксиду заліза FeO, у вигляді окислів переходять в шлак. Кремній і марганець, які залишилися в твердому розчині (фериті) після розкислення, збільшують його міцність і твердість.

Сірка є шкідливою домішкою в сталі, викликаючи явище червоноламкості: по межах зерен утворюється легкоплавка евтектика Fe+FeS ($t_{\text{пл}}=988^{\circ}\text{C}$), яка при гарячій пластичній деформації ($1000\dots 1200^{\circ}\text{C}$) розплавляється і утворюються тріщини. Марганець

різко зменшує явище червоноламкості через утворення більш тугоплавкої сполуки MnS ($t_{пл}=1620^{\circ}C$), але велика кількість вкраплень MnS різко окричує сталь. В залежності від якості сталі вміст сірки не перевищує 0,035...0,060%.

Вміст фосфору в залежності від якості сталі не повинен перевищувати 0,025...0,045%. Фосфор суттєво підвищує поріг холодноламкості сталі (кожний 0,01% P збільшує його на 20...25 $^{\circ}C$) та зменшує роботу розповсюдження тріщини. Фосфор також має велику схильність до ліквації.

Кисень, водень та азот – шкідливі приховані домішки. Їх присутність в сталі призведе до різкого зниження пластичності та збільшення схильності сталі до крихкого руйнування.

Класифікація сталей за структурою у рівноважному стані. Діаграма стану Fe-Fe₃C дозволяє визначити структуру в стані рівноваги, тобто після відпалення (дуже повільне охолодження разом із піччю). За структурою сталі поділяють на групи:

– *технічне залізо* - $\leq 0,02\%C$. Структура: ферит або ферит з цементитом третинним, якій розташовується на межах феритних зерен, його вміст не перевищує 0,3% відносно всієї маси сплаву. Його можна виявити тільки при збільшенні в 400-600 разів. Цементит погано травиться і має блискучий вигляд. Після травлення в 4 %-ному розчині HNO_3 ферит і цементит мають світлий колір. Для ідентифікації використовують лужний розчин пікрату натрію, після травлення в якому цементит набуває колір від темно-бурого до чорного, а ферит залишається світлим;

– *доевтектоїдні сталі* – $0,02\% < C < 0,8\%$. Структура: ферит (світлого кольору) та перліт (темного). З підвищенням вмісту вуглецю кількість фериту в об'ємі сплаву зменшується, а перліту – збільшується. При великій кількості фериту – він розташовується у вигляді масивних виділень, при малій кількості – по межах зерен перліту;

– *евтектоїдна сталь* – 0,8 %C. Структура: перліт. При великому збільшенні (~500 разів) спостерігається пластинчаста будова за рахунок утворення рельєфу на поверхні шліфа внаслідок різного полірування та травлення фериту та цементиту. Пластинки цементиту розташовані вище пластинок фериту і утворюють тінь на площині

шліфа. При невеликих збільшеннях перліт має вигляд темної складової.

– *заевтектоїдні сталі* – $0,8\% < C \leq 2,14\%$. Структура: перліт та цементит вторинний, який розташовується у вигляді світлої сітки, що оточує темнішу перлітну складову.

Зі збільшенням в сталі вмісту вуглецю зростає кількість фази цементит, що має велику твердість і крихкість, а тому його частинки є перепорою на шляху переміщення дислокацій. Внаслідок цього зростають міцність і твердість сталі, знижуються показники ударної в'язкості та пластичності. Зменшення міцності заевтектоїдних сталей зумовлено наявністю крихкої сітки структурно вільного цементиту, розташованого по межах зерен перліту. Твердість сталі монотонно зростає із збільшенням вмісту вуглецю.

Властивості сталі визначаються співвідношенням фериту та цементиту, будовою структурних складових (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 – Властивості вуглецевих сталей в залежності від структурних складових

Структурні складові	Властивості		
	Твердість, НВ	Границя міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %
Технічне залізо	600...700	150...200	60
Ферит	800...1000	200...250	40...50
Аустеніт	1600...2000		50...60
Цементит	≥ 8000	30...35	0
Перліт	1600...2500	500...900	8...15
Ледебурит	≥ 6000		0

Класифікація сталей за призначенням. Маркування сталей. В залежності від вмісту вуглецю сталі поділяють на конструкційні та інструментальні.

Конструкційні: 0,02-0,8 %С. Мають структуру ферит та перліт (доевтектоїдні сталі) або перліт (евтектоїдна сталь (0,8%С)). Конструкційні сталі поділяються на сталі звичайної якості та якісні.

Сталі звичайної якості – широко використовують в будівництві і для слабонавантажених деталей машин та предметів широкого

використання. Сталь виготовляють гарячекатаною – сортовою, фасонною, товсто- та тонколистовою і холоднокатаною. Із цих сталей виготовляють труби, поковки, штамповки, дріт тощо.

Сталі маркують “Ст” і цифрою (від 0 до 6), що вказує номер марки. Чим більше номер, тим більше кількість вуглецю і тим вище міцність (300...600МПа), але нижче пластичність (22-14 %).

Ступінь розкислення позначається індексами в марці сталі (табл.7.2), наприклад, Ст5пс.

Таблиця 7.2 – Класифікація сталей за розкисленням

Сталь	Індекс в позначенні	Розкислення	Звичайний вміст кремнію, %
Спокійна	сп	Mn+Si+Al	0,14-0,30
Напівспокійна	пс	Mn+Al	0,05-0,10
Кипляча	кп	Mn	<0,05

Сталі звичайної якості містять 0,06-0,49 %С та домішки: 0,25-0,8%Mn, 0,05-0,3%Si, S≤0,05% та P<0,04%.

Вуглецеві якісні сталі – на відміну від сталей звичайної якості містять меншу кількість домішок та неметалевих вкраплень. Вони надходять з гарантованим хімічним складом та механічними властивостями без термічної обробки (гарячекатаними, кованими), після термічної обробки та нагартовки. Маркуються двозначними числами 05, 08, 10, 15,...,80, що вказують середній вміст вуглецю в сотих частках процента. Наприклад, сталь 10 містить 0,1 %С. Індексом маркуються напівспокійні – “пс” та киплячі – “кп” сталі. Спокійні сталі маркуються без індексу. Ці сталі використовують досить широко через відносно невисоку вартість та задовільну технологічність при обробці.

Автоматні сталі – це конструкційні сталі, що добре обробляються різанням внаслідок утворення ламкої стружки. До складу цих сталей вводять сірку (до 0,3%) або свинець (до 0,3%) та селен (0,1%), що сприяють утворенню ламкої стружки, букви С і Е позначають додаток свинцю та селену, відповідно.

Маркуються: А12 – автоматна сталь, що містить 0,12%С; А35Е – автоматна сталь, що містить 0,35%С, 0,1% селену.

Інструментальні вуглецеві сталі 0,7...1,3%С – переважно, евтектоїдні або заевтектоїдні сталі. Вони бувають якісними У7, У8,...,У13 та високоякісними У7А, У8А,...,У13А. Буква “У” вказує, що сталь вуглецева інструментальна, а число – середній вміст вуглецю у десятих частках процента, наприклад, У10 – вуглецева інструментальна сталь, що містить 1,0%С, У12А – вуглецева інструментальна високоякісна сталь, що містить 1,2%С. Буква А – високоякісна сталь; має знижений вміст сірки та фосфору.

Їх використовують для виготовлення різального інструменту (дрібних мітчиків, свердел), вимірювального (калібрів, скоб) та штампового інструменту для деформування (матриць, пуансонів). Інструмент використовують після термічної обробки.

В таблиці 7.3 наведені вуглецеві конструкційні та інструментальні сталі, їх хімічний склад та призначення.

Таблиця 7.3 – Вуглецеві конструкційні та інструментальні сталі

<i>Сталі вуглецеві конструкційні звичайної якості (ДСТУ 2651:2005)</i>						
<i>Марка сталі</i>	<i>Вміст елементів, %</i>					<i>Призначення</i>
	<i>С</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>≤P</i>	<i>≤S</i>	
Ст0	≤0,23	-	-	0,07	0,06	Конструкції невідповідального призначення: огороження, прокладки, шайби, тощо. Добра зварюваність.
Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	≤0,05	0,04	0,05	Для деталей, що вимагають високої в'язкості та низької твердості: анкерні болти, арматура, тощо. Добра зварюваність.
Ст3сп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,3	0,04	0,05	Балки, ферми, корпуси посудин, що працюють під тиском. Деталі, що цементують: шестерні, осі, тощо. Добра зварюваність.
Ст5пс	0,28-0,37	0,50-0,80	0,05-0,15	0,04	0,05	Для деталей, що витримують невеликі напруження: вали, осі, серги ресор, тощо.
Ст6сп	0,38-0,49	0,5-0,8	0,15-0,30	0,04	0,05	Деталі підвищеної міцності: осі, вали, тяги, пальці траків, шпindelі, тощо.

Продовження табл.7.3

<i>Сталі вуглецеві конструкційні якісні (ГОСТ 1050-88)</i>		
<i>Група сталі</i>	<i>Маркування</i>	<i>Призначення</i>
Низьковуглецеві (0,05-0,08 %С)	05, 08	Мають низьку міцність та високу пластичність, використовуються без термічної обробки для холодного штампування, холодного видавлювання: кузова автомобілів, корпуси приладів, прокладки, трубки, тощо.
Маловуглецеві (0,10-0,30 %С)	10, 15, 20, 25	Для деталей, що піддають цементації (ціануванню) та працюють на зношування без великих навантажень: втулки, осі кулачкових валиків, кільця ланцюгів, тощо.
Середньовуглецеві (0,30-0,50%С)	30, 35, 40, 45, 50	Після нормалізації, термічного поліпшення чи поверхневого гартування для деталей, що зазнають згинання, обертання, зношення, ударні навантаження: колінчасті та розподільні вали, плунжери, шестерні та вали редукторів тощо
З вмістом вуглецю 0,55-0,75%	60, 65, 70, 75	Після гартування та середньотемпературного відпуску мають високі пружні властивості та використовуються для виготовлення пружин, ресор, тощо
<i>Автоматні сталі (ГОСТ 1414-75)</i>		
Вуглецева, що містить сірку	A1, A12, A20, A30, A35	Деталі складної конфігурації з вимогами високої точності розмірів та чистоти поверхні: шестерні, валики, заслінки, клапани, кільця, пальці, ходові гвинти металорізальних верстатів, деталі кріплення тощо
Вуглецева, що містить свинець	AC14, AC40	Теж саме
Вуглецева, що містить сірку та селен	A35E, A45E	Теж саме
<i>Сталі вуглецеві інструментальні (ГОСТ 1435-99)</i>		
1	У7, У7А, У8, У8А	Ударні інструменти для слюсарно-монтажних робіт та обробки дерева: сокири, пили, фрези, молотки тощо
2	У9, У9А, У10, У10А	Штампи для холодного штампування, фрези, зенкери, викрутки, калібри
3	У12, У12А, У13, У13А	Інструменти, що не піддаються ударним навантаженням: напилки, шабери, інструмент для гравірування

7.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Особливу увагу приділити вивченню фазових та структурних перетворень в системі Fe-Fe₃C. Засвоїти залежність механічних властивостей від хімічного складу вуглецевих сплавів. Вивчити маркування вуглецевих сталей та їх вибір для деталей та інструментів.

Підготувати табл. 8.4.

7.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. На метастабільній діаграмі Fe-Fe₃C визначити точки, концентрації, температури, фази та структури.
2. Поліморфні перетворення в чистому залізі.
3. Що таке ферит, аустеніт, цементит, перліт та ледебурит? Вказати їх властивості.
4. Сутність перитектичного, евтектичного та евтектоїдного перетворень.
5. Які перетворення відбуваються при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдних та заевтектоїдних сплавах.
6. Як за допомогою правила фаз побудувати криву охолодження для будь-якого сплаву?
7. Як за допомогою правила відрізків визначити склад фаз та їх кількість за масою ?
8. Чим обумовлено виділення Ц_{II} та Ц_{III} при охолодженні ?
9. Що таке сталь, як впливає вуглець на структуру та властивості сталей після відпалення ?
10. Класифікація вуглецевих сталей за структурою у відпаленому стані.
11. Класифікація вуглецевих сталей за призначенням. Маркування вуглецевих сталей.
12. Призначення вуглецевих сталей.

7.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набори зразків: технічно чисте залізо, сталі з різним вмістом вуглецю у відпаленому стані; альбоми з фотографіями мікроструктур; прилад ТШ-2 для вимірювання твердості; для дослідження структури оптичний мікроскоп МИМ-7.

7.5 Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

7.6 Порядок виконання роботи

1. Дослідити структуру зразків відпалених вуглецевих сталей. Визначити за структурою приблизно вміст вуглецю.

2. Зарисувати структуру досліджених зразків, вказати структурні складові.

3. На зразках з різним вмістом вуглецю визначити твердість, розрахувати кількість фази “цементит”. Дані занести в табл. 7.4.

Таблиця 7.4 – Залежність структури та твердості від вмісту вуглецю в сталі

<i>%C в зразках</i>	<i>Марка сталі</i>	<i>Структура (записати)</i>	<i>Твердість, НВ</i>	<i>Кількість C, %</i>	<i>Структурний клас у сталі рієноваги</i>	<i>Призначення (по групам)</i>

4. Побудувати графік залежності “твердість – кількість цементиту”.

5. Для сталі 20 при температурі 600°C визначити вміст вуглецю у фазах, кількість фериту, як фази так і структурної складової.

7.7 Зміст звіту

1. Зарисувати метастабільну діаграму стану Fe-Fe₃C. Стисло описати фази, структурні складові та їх властивості.

2. Нанести лінії досліджених сплавів на діаграму та побудувати для них криві охолодження користуючись правилом фаз.

3. Схематично зобразити структуру зразків вуглецевих сталей з різним вмістом вуглецю та позначити структурні складові.

4. Класифікувати вуглецеві сталі за структурою у відпаленому стані, вказати принцип їх маркування та призначення.

5. За результатами дослідження обґрунтувати зв'язок між структурою та властивостями вуглецевих сталей.

7.8 Література

[1] с. 198-215; [3] с. 186-207; [4] с. 135-154; [5] с. 161-198.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ МІКРОСТРУКТУР

СТАЛЕЙ

Мета роботи: вивчити особливості мікроструктур в сталях, що відрізняються від рівноважних, умови їх утворення та засоби усунення.

8.1 Загальні відомості з теорії

В сплавах, до складу яких входять метали з поліморфними перетвореннями, перекристалізація відбувається з більш великими відхиленнями від рівноважної температури, ніж при кристалізації. Нові модифікації можуть достатньо довго існувати у метастабільному стані.

Перекристалізація сплавів із поліморфними перетвореннями має багато загального з кристалізацією: вона теж відбувається внаслідок утворення зародків та наступного росту нової фази. Однак фазові перетворення у твердому стані мають певні особливості, тому що вихідна фаза не рідка, а кристалічна.

В залежності від ступеня переохолодження, поліморфне $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення може відбуватися або дифузійним, або бездифузійним шляхом, що обумовлює отримання тих чи інших структур.

Розглянемо утворення деяких структур в сталях в залежності від умов перекристалізації.

8.1.1 Відманштеттова структура

Довготривале нагрівання доєвтектоїдної (заєвтектоїдної) сталі при підвищених температурах приводить до утворення зерна аустеніту великого розміру.

Під час прискореного охолодження сталі від високих температур збільшується ступінь переохолодження, виникає велика кількість центрів зародків не тільки на межах, а і в середині зерен аустеніту. За таких умов, частіше за все, утворення зародка нової фази іде за принципом структурного та розмірного співвідношення. Зародок сполучається з вихідною фазою (матрицею) найбільш схожими за розташуванням атомів площинами та відстанню між атомами.

Характерною ознакою такої структури є орієнтоване, спрямоване розташування пластин фериту у доевтектоїдних та цементитних голок у заевтектоїдних сталях. Така орієнтована структура отримала назву – відманштеттової, спостерігали її вперше в структурі метеоритів.

Виникає відманштеттова структура, як правило, у литій або значно перегрітій сталі, після зварювання або у деталях, що працюють тривалий час при високій температурі.

Умовою утворення такої структури є крупне зерно аустеніту та прискорене охолодження. За таких умов форма та орієнтування зародків нової фази повинні бути здатними до зменшення поверхневої енергії, що досягається при найбільшій спорідненості у розташуванні атомів, які стикаються на гранях старої та нової фаз. Тому кожний зародок, що підпорядковується співвідношенню пружної та поверхневої енергій, розвивається за певними кристалографічними напрямками. Орієнтація фериту підпорядковується принципу структурної відповідності. Взаємнопаралельні площини: $\{110\}_\Phi // \{111\}_A$ і напрямки $\langle 111 \rangle_\Phi // \langle 110 \rangle_A$. Вони є найбільш щільнопакованими в ОЦК гратці фериту і ГЦК аустеніту. Орієнтовані кристали мають форму довгих пластин (голок), що перетинаються та подрібнюють зерна на окремі комірки.

Сталі з відманштеттовою структурою у зв'язку з її крупнозернистістю та пластинчастою будовою структурних складових мають понижене значення видовження і низький опір удару.

Виправлення такої структури можливе відпаленням при нагріванні в однофазну область, витримці і повільного охолодження із пічкою.

8.1.2 Анормальна структура

Така структура найчастіше зустрічається у заевтектоїдних сталях, в яких надлишковий цементит знаходиться у вигляді масивних включень, що оточені феритом. Перліт має грубу будову; грубі включення цементиту важко розчиняються в аустеніті при нагріванні.

Анормальна структура утворюється внаслідок схильності сталі до утворення роздільного евтектоїду. В цих випадках ферит та цементит зростають не сумісно, як при утворенні перліту, а незалежно один від одного. Сприяють утворенню анормальної структури домішки, що змінюють термодинамічну активність вуглецю у

напрямку збільшення коалесценції цементиту та поширюють інтервал метастабільного перліту (за рахунок збільшення поверхневого натягу його складових – фериту та цементиту), а також збільшують різницю вільних енергій $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворень. До таких домішок належать O_2 , В, Р, Мо, W, Si, Cu.

Перешкоджають розвитку аномальної структури такі елементи, як H₂, Mn, Cr, Ni.

8.1.3 Смугаста структура

Чергування смуг фериту та перліту виявляється іноді у доевтектоїдних сталях з волокнистим зламом після гарячої обробки тиском.

Смугаста структура може утворюватися за двох причин:

– по-перше, внаслідок забруднення сталі неметалевими включеннями (оксидами, сульфідами), що не розчинилися в аустеніті при гарячій обробці тиском і витягнулися у вигляді смуг у напрямку дії зусилля, тому можуть являтися центрами кристалізації для зон фериту і орієнтують його смугами;

– по-друге, така структура може виникати внаслідок дендритної ліквідації литого металу. Осі дендритів, що твердіють у першу чергу, більш збагаченні вуглецем, а міжосьві проміжки збагачені марганцем, кремнієм, а також фосфором та сіркою. Дендритна неоднорідність зберігається і в деформованому стані (гаряча деформація відбувається при температурах вище A_{c3} (GS) або A_{cm} (ES), тобто у аустенітному стані). Тому при охолодженні перліт утворюється із аустеніту, збагаченому вуглецем, там, де були осі дендритів, а ферит – в місцях, збагачених сіркою, фосфором та іншими домішками.

Якщо обробка тиском проводилась при температурах нижче A_{c3} , тобто у двофазній області аустеніту та фериту, тоді ферит витягується у напрямку зусилля, що також обумовлює отримання смугастої структури.

Смугаста структура характеризується, перш за все, анізотропією властивостей вздовж та впоперек рядків, а також погіршенням механічних властивостей.

Для запобігання утворенню смугастої структури в сталях, що забруднені неметалевими включеннями, їх потрібно прискорено охолоджувати з аустенітної області.

Для виправлення структури сталі після прокатки відпалюють або нормалізують.

В легованих сталях карбіди при температурі гарячої деформації розташовуються у вигляді рядків вздовж напрямку прокатки. Така структура спостерігається в легованих заевтектоїдних сталях, що мають у структурі вторинні та первинні (евтектичні) карбіди.

8.1.4 Знеуглецювання

Знеуглецювання – один з дефектів сталі. В цьому випадку структура сталі безперервно змінюється від поверхні в глибину.

Процес знеуглецювання реакційно-дифузійний. На поверхні металу відбувається хімічна реакція – з'єднання вуглецю з киснем атмосфери печі, при цьому кількість вуглецю зменшується майже до нуля. З середини зразків дифузійним шляхом до поверхні безперервно підходить все нова порція вуглецю за законом вирівнювання концентрацій розчину. Коли швидкість хімічної реакції значно перевищує швидкість дифузії, вуглець не встигає дифундувати від центру до периферії – спостерігається повне знеуглецювання поверхневого шару. Якщо швидкість реакції незначно перевищує швидкість дифузії, спостерігається часткове знеуглецювання.

Знеуглецювання псує саму цінну частину деталі – поверхню, оскільки найбільші напруження під час роботи деталей та знос виникають на їх поверхні. Тому різко понижується міцність, твердість, зносостійкість, границя втоми. Щоб уникнути знеуглецювання поверхні виробу під час його нагрівання до високих температур використовують захисні атмосфери.

8.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Приділити увагу вивченню теоретичних питань про перетворення залізовуглецевих сплавів у нерівноважному стані. Знати умови утворення таких структур як відманштеттова, анормальна, смугаста.

8.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. За яких умов може відбуватися процес перекристалізації в залізовуглецевих сплавах?

2. Відманштеттова структура доевтектоїдної та заевтектоїдної сталей, умови утворення, будова цих структур.

3. Анормальна структура сталей. Умови утворення, будова такої структури.

4. Смугаста (рядкова) структура. Умови утворення, будова цієї структури.

5. Зневуглецювання, умови утворення, наслідки цього дефекту. Методи запобігання зневуглецюванню.

8.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків для проведення мікроаналізу; металографічний мікроскоп МИМ-7; альбом з фотографіями мікроструктур.

8.5 Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

8.6 Порядок виконання роботи

Дослідити під мікроскопом мікрошліфи з відманштеттовою, анормальною та смугастою структурами.

8.7 Зміст звіту

1. Схематично зобразити відманштеттову структуру доевтектоїдної та заевтектоїдної сталей, анормальну структуру сталі У13, смугасту структуру сталей 15 та 35.

2. Пояснити умови утворення цих структур, їх вплив на властивості та способи позбавлення від них.

8.8 Література

[3] с. 87, 143, 207; [8] с. 134.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНІВ

Мета роботи: вивчення мікроструктури чавунів різних марок, впливу хімічного складу та структури на властивості чавунів.

9.1 Загальні відомості з теорії

Чавунами називають сплави заліза з вуглецем, що містять більш 2,14 %С. Крім вуглецю чавун містить корисні елементи Si (0,8-3,8%), Mn (0,5-1,0%), а також шкідливі домішки P (0,2-0,3%), S≤0,15%. Завдяки сполученню добрих ливарних властивостей, достатній міцності, зносостійкості, а також, відносно невеликій вартості, чавуни широко застосовуються у промисловості.

9.1.1 Класифікація чавунів

Класифікація чавунів відбувається за наступними ознаками:

1. За станом вуглецю (вільний – у вигляді графіту або зв’язаний – у вигляді цементиту Fe_3C): білий, половинчастий, сірий, ковкий, високоміцний. Назва білих і сірих чавунів по кольору зламу, назва ковких – умовна.
2. За формою графіту – сірий з пластинчастим графітом (СЧ), високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧ), чавун з вермікулярним графітом (ЧВГ), ковкий чавун (КЧ) з пластівчастим графітом.
3. За типом металевої основи (матриці) – феритний, ферито-перлітний, перлітний.
4. За хімічним складом – нелеговані та леговані чавуни.

9.1.2 Фази та структурні складові чавунів

В чавунах можуть бути присутніми такі фази та структурні складові як ферит, аустеніт, цементит, графіт та перліт. Внаслідок більш високого, порівняно з вуглецевими сталями, вмісту кремнію, твердість та міцність фериту і перліту в чавуні вищі, ніж у сталі. Твердість фериту при вмісті кремнію 0,8% складає 900МПа, а при 2,3%Si твердість сягає 1250МПа. Міцність фериту при 2,0%Si складає 400МПа. Твердість перліту в чавуні при 2,0%Si знаходиться в межах 2100...3300МПа, міцність сягає 700МПа.

При кристалізації чавунів може утворюватися графіт, ледебурит та фосфідна евтектика. Графіт містить 100% вуглецю, має складну

гексагональну ґратку. Температура плавлення перевищує 3500°C, міцність дорівнює 3,7МПа.

Фосфідна евтектика – тверда (4000...5000МПа) та крихка складова. При кристалізації може утворюватися потрійна евтектика ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{Fe}_3\text{P}$) та подвійна евтектика ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$). Утворення легкоплавкої фосфідної евтектики (температура кристалізації евтектики 900-980°C) призводить до поліпшення рідкотекучості. Утворення фосфідної евтектики негативно впливає на в'язкість чавунів, але при цьому підвищує його твердість та зносостійкість.

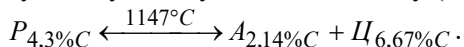
Механічні властивості чавунів залежать від структури металевої основи, від форми, розмірів та кількості графіту.

9.1.3 Білий чавун

В білому чавуні майже весь вуглець знаходиться у зв'язаному стані у вигляді цементиту Fe_3C . Цементит надає зламу білий, блискучий вигляд. Утворюється при прискореному охолодженні у відповідності до метастабільної діаграми „залізо-цементит” ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$) (рис. 7.1).

Імовірність утворення в рідкій фазі (або аустеніті) метастабільного цементиту, який містить 6,67%С, значно більша ніж графіту (100%С). Тому в умовах прискореного охолодження кінетично більш вигідно утворення цементиту, незважаючи на те, що при всіх температурах кристалізації термодинамічно більш стабільною фазою є графіт.

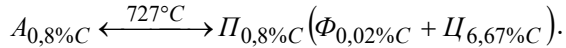
Білі чавуни за структурою поділяють на доевтектичні (2,14%С < 4,3), евтектичні (4,3%С) і заевтектичні (>4,3%С). Під час кристалізації доевтектичних чавунів із рідкої фази спочатку виділяються кристали аустеніту. При температурі 1147°C рідина, що залишається, набуває евтектичної концентрації (4,3%С). Внаслідок кристалізації рідини складу т.С, утворюється евтектика – ледебурит, яка складається в момент утворення із аустеніту складу т.Е та цементиту (т.Ф):



Ледебурит має сотову або зернисту будову. Евтектичний чавун (4,3%С) кристалізується при постійній температурі, з утворенням тільки ледебуриту. При кристалізації заевтектичних чавунів спочатку утворюються кристали цементиту. При температурі 1147°C рідина, що

залишається, має евтектичну концентрацію 4,3%С (т. С) і твердіє з утворенням ледебуриту.

З пониженням температури зменшується розчинність вуглецю в аустеніті за лінією ES, внаслідок цього відбувається виділення Цп. При температурі 727°C аустеніт з концентрацією 0,8%С перетворюється у перліт згідно евтектоїдної реакції:



Після закінчення кристалізації білі чавуни в залежності від структурного класу будуть мати таку структуру:

- доевтектичні: перліт + цементит вторинний + ледебурит (перліт + цементит);
- евтектичні: ледебурит (перліт + цементит);
- заевтектичні: ледебурит (перліт + цементит) + цементит первинний (у вигляді пластин).

Білі чавуни не маркуються.

Велика кількість цементиту в структурі білих чавунів (64% при вмісті 4,3%С) зумовлює їх високу твердість (540...550НВ), низьку пластичність ($\delta \approx 0,1-0,2\%$), крихкість та неможливість обробки різанням. Їх висока твердість зумовлює підвищену зносостійкість в умовах абразивного зносу.

9.1.4 Сірий чавун

Сірий чавун – це високовуглецевий сплав, в якому вуглець частково або повністю знаходиться у вільному стані в вигляді пластинчастого графіту. Останній надає зламу сірий колір. Найбільш широко використовуються чавуни, що містять 3,0-3,8% С. Чим вище кількість вуглецю в чавунах, тим більше утворюється графіту і тим нижче його механічні властивості.

Структура сірих чавунів формується при повільному охолодженні відповідно до діаграми стабільної рівноваги Fe–C (рис. 9.1).

Утворення графіту із рідини – процес дуже повільний. Тому виділення графіту відбувається тільки при повільному охолодженні, коли ступінь переохолодження рідини знаходиться нижче температури ліквідус C'D'.

При евтектичній кристалізації, якщо рідина переохолоджена нижче лінії E'C'F', але вище лінії ECF, кристалізація цементиту стає термодинамічно неможливою і виділяється високовуглецева фаза –

графіт. Таким чином утворення графіту із рідини або із аустеніту відбувається у вузькому інтервалі температур між лініями стабільної та метастабільної діаграми, тобто в умовах малих переохолоджень.

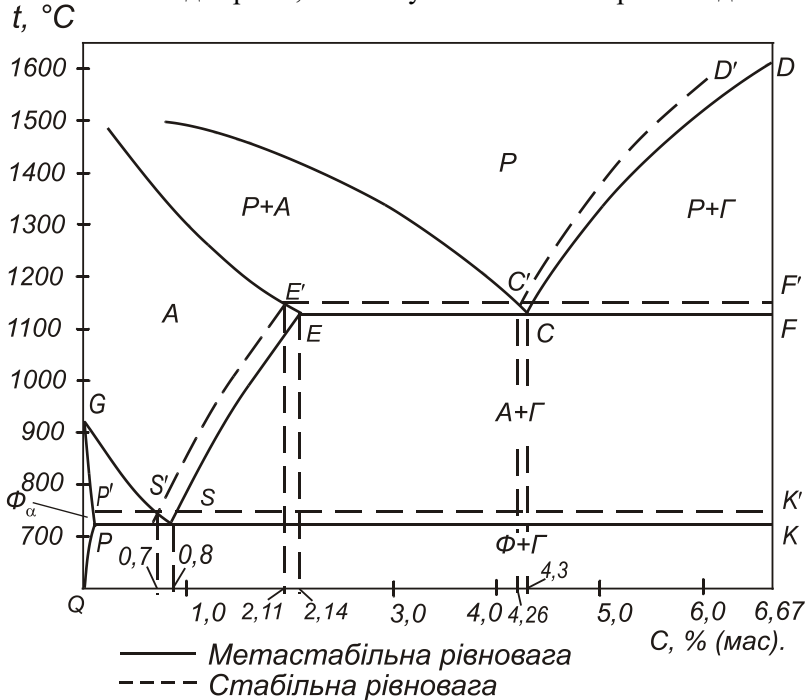


Рисунок 9.1 – Діаграма стану Fe-C

На процес утворення графіту впливає не тільки швидкість охолодження, а і хімічний склад чавуну. Елементи Si, Ni, Cu та Al є графітизаторами. Карбідоутворювачі – це елементи Mn, Cr, Mo, W, які сприяють утворенню цементиту.

Графітизатори підвищують $t_{СТ}$ (температура стабільного перетворення) та понижують $t_{МЕТ}$ (температура метастабільного перетворення). Внаслідок цього вже при невеликій концентрації графітизаторів інтервал між $t_{СТ}$ та $t_{МЕТ}$ різко зростає і збільшується можливість утворення в сплаві графіту.

Кремній має значний вплив на структуру чавуну. Вміст кремнію у сірому чавуні складає 1-3%. Розглянемо політермічний переріз діаграми Fe-C-Si з постійним вмістом кремнію (рис. 9.2).

На відміну від діаграми Fe-C в потрійній системі Fe-C-Si евтектичне ($P \rightarrow A + \Gamma$) і евтектоїдне ($A \rightarrow \Phi + \Gamma$) перетворення відбувається не при постійній температурі, а в деякому інтервалі температур, тобто Si розширює інтервал цих перетворень і сприяє процесу графітизації.

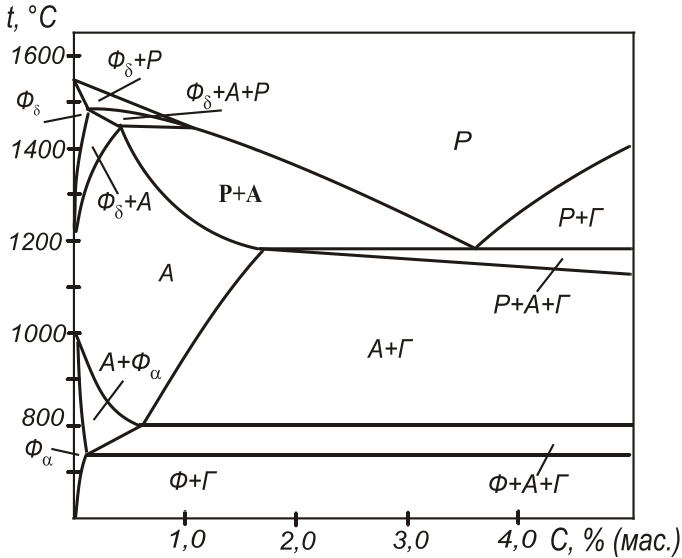


Рисунок 9.2 – Політермічний переріз діаграми стану Fe-C-Si (2,0% Si)

Структура сірих чавунів (СЧ) формується в результаті виділення аустеніту та графіту. В доевтектичних чавунах кристалізація починається з виділення кристалів аустеніту, а в заевтектичних чавунах твердіння починається з виділення графіту первинного і закінчується в обох випадках евтектичним перетворенням. При визначеній швидкості охолодження та хімічному складі евтектична кристалізація може проходити з одночасним виділенням графіту та цементиту. Такі чавуни називають *половинчастими*. Кінцева будова металевої основи СЧ визначає евтектоїдний розпад. В залежності від складу та умов охолодження аустеніт розпадається за евтектоїдною реакцією $A \rightarrow \Phi + \Gamma$ і матриця має феритну структуру, або $A \rightarrow \Phi + \Psi$, тоді формується перлітна основа; якщо одночасно відбуваються

обидві евтектоїдні реакції, тоді в СЧ утворюється ферито-перлітна основа.

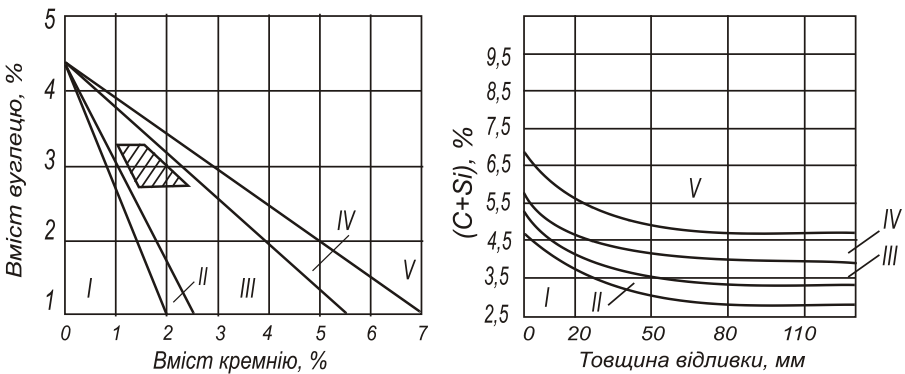
Графіт в СЧ пластинчастої форми, яка в площині шліфа має вигляд пластин.

Структура чавуну у відливках залежить від вмісту вуглецю та кремнію і швидкості кристалізації.

Змінюючи швидкість охолодження та вміст основних елементів: вуглецю та кремнію, можна отримати чавун з різною структурою та властивостями – від білого до феритного сірого чавуну. Вплив С та Si показано на рис. 9.3 (а), а вплив швидкості охолодження при визначеному вмісті основних елементів С і Si – на рис. 9.3, б.

За будовою металевої основи СЧ поділяють на феритні, ферито-перлітні, перлітні.

Механічні властивості сірого чавуну зумовлені його структурою, головним чином графітною складовою. Пластинки графіту є концентраторами напружень (виконують роль надрізів), тому СЧ характеризуються низькими механічними властивостями (міцності та пластичності). Але сірий чавун має добрі антифрикційні властивості завдяки змащенню графітом.



а – вплив С та Si на структуру чавунів;

б – вплив швидкості охолодження (товщини відливки) та суми C+Si на структуру чавунів

Рисунок 9.3 – Структурні діаграми для чавунів

(I – білі чавуни; II – половинчастий чавун; III – перлітний сірий чавун; IV – ферито-перлітний сірий чавун; V – феритний сірий чавун)

Згідно ГОСТ 1412–85 сірі чавуни маркуються буквами та цифрами (СЧ10, СЧ15). Цифра відповідає мінімальному значенню

границі міцності при розтягуванні (відповідно 100 і 150 МПа). Перлітна металева основа в сірому чавуні забезпечує найбільшу міцність. Наявність фериту в структурі не збільшує пластичність і в'язкість чавуну, але знижує його міцність і зносостійкість. Найменша міцність у феритного сірого чавуну.

Модифікування. З метою підвищення комплексу механічних властивостей чавунів використовують модифікування. У рідкий сірий чавун додають модифікатори, які впливають на процес кристалізації і графітизації. Модифікатори поділяють на дві групи: модифікатори I роду – елементи, що утворюють тугоплавкі частинки, виступають готовими центрами графітизації і приводять до подрібнення графітних включень; модифікатори II роду – поверхнево-активні елементи, що зменшують поверхневу енергію зростаючих зародків графіту і таким чином змінюють форму та розмір графітних включень.

Модифікований чавун отримують шляхом додавання у рідкий чавун феросиліцію або силікокальцію у кількості 0,3...0,8 %.

Сірий чавун застосовують для виготовлення сільськогосподарських машин, верстатів, автомобілів, тракторів, металургійного устаткування.

9.1.5 Вибілений чавун

При відливці сірого чавуну в металеві форми або вологу земляну форму можна отримати структуру білого чавуну (вібл) на деяку глибину (12...30мм) за рахунок швидкого охолодження поверхні. Такі чавунні відливки називають вибіленими. В середині відливок при їх повільному охолодженні утворюється структура сірого чавуну.

Чавунні відливки з вибіленою поверхнею використовують для деталей, які повинні мати високу поверхневу твердість та зносостійкість: прокатні валки, кулі подрібнювальних установок, гідравлічні циліндри.

9.1.6 Високоміцний чавун

Високоміцний чавун – це високовуглецевий сплав, в якому вуглець частково або повністю знаходиться у вільному стані у вигляді кулястого (глобулярного) графіту (3,0 – 3,6%С, 1,2 – 2,0%Si, 0,3 – 0,9%Mn). Такий чавун отримують шляхом введення у рідкий сірий чавун модифікаторів II роду (поверхнево-активних елементів). Внаслідок дії модифікаторів графіт в процесі кристалізації набуває не

пластинчасту, а кулясту форму. Як модифікатори II роду використовують магній (Mg) або церій (Ce) (0,03...0,08%). Кількість модифікаторів визначається вмістом в чавуні вуглецю, кремнію та сірки. Поверхнево-активні речовини, осідаючи на поверхні фаз, що кристалізуються, знижують поверхневу енергію на межі поділу “рідина-тверда” фаза, що зменшує критичний розмір зародка та змінює його форму. Структурування в високоміцних чавунах при первинній та вторинній кристалізаціях відбувається аналогічно процесам в сірому чавуні, змінюється тільки форма графіту, а металева основа може бути феритною, ферито-перлітною та перлітною.

Високоміцні чавуни маркуються згідно з ДСТУ 3925-99 буквами ВЧ та цифрами, які вказують на мінімальне значення тимчасового опору під час розтягнення в МПа та через дефіс – мінімальне значення відносного видовження у відсотках: ВЧ420-12, ВЧ450-5, ВЧ600-3, ВЧ1000-2 ($\sigma_B = 1000 \text{ МПа}$, $\delta = 2\%$).

Високоміцний чавун має високі механічні властивості, що зумовлено кулястою формою графіту, який значно менше, ніж пластинчастий в сірому чавуні, послаблює металеву основу. Коефіцієнт концентрації напружень біля графіту пластинчастої форми складає 4,0...7,5, а біля графіту кулястої форми – 2,5...3,5.

Феритний чавун ВЧ420-12 характеризується помірною міцністю та високою пластичністю. Ферито-перлітний чавун ВЧ450-5 має більш високу міцність, але меншу пластичність. В перлітних чавунах ВЧ700-2, ВЧ800-2 – при більш високій міцності зменшується пластичність.

Однак високоміцні чавуни з кулястою формою графіту характеризуються погіршенням ливарних властивостей порівняно з сірими чавунами.

Високоміцні чавуни застосовуються як матеріали для відповідальних деталей, що працюють в умовах дії ударних і знакозмінних напружень та зношення: колінчасті вали, деталі прокатних станів, траверс пресів; корпуси компресорів, крупногабаритних штампів, шестерен, ступиць коліс, корпуса гідротурбін, тощо.

9.1.7 Чавун з вермікулярним графітом

Чавун з вермікулярним графітом займає проміжний стан між чавунами з пластинчастою та кулястою формою (лат. *vermicula* – черв'як). Графітні вкраплення мають черв'якоподібну форму, пластинки скорочені і закруглені. Вермікулярні включення поліпшують ливарні властивості; така форма графіту порівняно з пластинчастою у сірому чавуні поліпшує механічні властивості (табл. 9.1).

Таблиця 9.1 – Властивості чавунів із пластинчастою, вермікулярною та кулястою формами графіту

<i>Властивості</i>	<i>Чавун з пластинчастим графітом</i>	<i>Чавун з вермікулярним графітом</i>	<i>Чавун з кулястим графітом</i>
σ_B , МПа	100...400	300...600	350...900
$\sigma_{0,2}$, МПа	-	230...450	250...600
δ , %	<1,0	0,5...8,0	3...25
σ_Z , МПа	300...600	500...800	800...1200
Твердість, МПа	1400...3000	1350...2800	1400...3500

Для отримання чавуну з вермікулярним графітом, використовують ті ж поверхнево-активні домішки, що і для високоміцного чавуну, але у меншій кількості (0,015-0,02%Mg; 0,02-0,06%Ce).

До переваг чавуну з вермікулярним графітом, порівняно з високоміцним чавуном, можна віднести більш високу теплопровідність та меншу схильність до вибілу. Механічні властивості чавунів із вермікулярним графітом менше залежать від швидкості охолодження, на відміну від сірих чавунів. Маркують за таким же принципом, як і високоміцний (ЧВГ 300 - 4).

Використовують чавуни з вермікулярним графітом для великих відливок складної конфігурації (деталі дизелів), які працюють в умовах динамічних та термоциклічних навантажень).

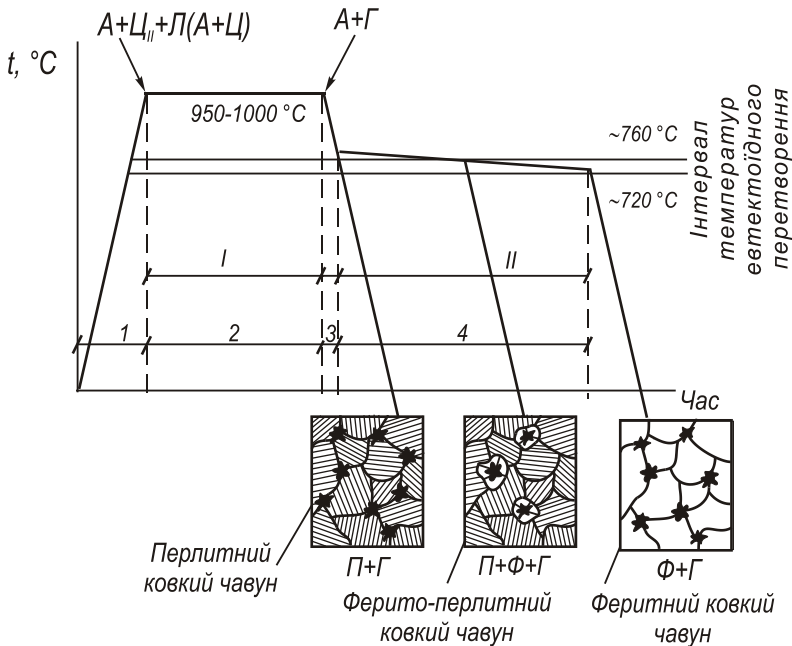
9.1.8 Ковкий чавун

Ковкий чавун – це високовуглецевий сплав, в якому вуглець частково або повністю знаходиться у вільному стані, у вигляді графіту пластівчастої форми.

Ковкий чавун отримують в результаті графітаційного відпалення відливок білого доєвтектичного чавуну, що містить 2,5-3,0%С, 1,0-1,5%Si, 0,3-0,8%Mn. Внаслідок відпалення утворюються включення графіту пластівчастої форми, які забезпечують високу пластичність ковкого чавуну ($\delta \approx 20\%$), (для білого чавуну $\delta \approx 0,2\%$).

Кількість кремнію повинна бути такою, щоб не утворювався графіт у вихідній відливці. Кількість марганцю теж обмежена, тому що він гальмує розпад цементиту, який відбувається під час графітаційного відпалення. Відливки тонкостінні до 50 мм, щоб забезпечити на початковій стадії структуру білого доєвтектичного чавуну.

Графітаційне відпалення проводиться у дві стадії (рис. 9.4). Відливки запаковують в ящики або розміщують в печі з захисною атмосферою.



1 – нагрівання; 2 – перша стадія графітазації; 3 – проміжна стадія;
4 – друга стадія графітазації

Рисунок 9.4 – Схема графітаційного відпалення білого чавуну

Під час нагрівання до температури першої стадії (950-1000°C) спочатку відбувається перетворення перліту в аустеніт, а потім часткове розчинення вторинного цементиту (Ц_{II}) та гомогенізація аустеніту за вмістом С та Si.

На початку температурної витримки структура відливок А+Л+Ц. Під час витримки при 950-1000°C відбувається перша стадія графітизації, після закінчення якої весь цементит евтектичного походження та залишки Ц_{II} розпадаються $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe}(\text{A}) + \text{C}(\text{Г})$. Графіт зароджується на межі поділу „аустеніт – цементит” і графітні крапління ростуть внаслідок дифузії атомів вуглецю, який розчинився в аустеніті до зародка графіту. Після завершення першої стадії структура чавуну А+Г (пластівчастої форми).

При охолодженні від 1000°C відбувається виділення із аустеніту вуглецю (згідно лінії діаграми SE), який нашаровується на графітних частинках чи утворює Ц_{II} . Розпад останнього ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{A} + \text{Г}$), призводить до росту графітних включень (проміжна стадія).

Евтектоїдне перетворення в чавунах проходить в інтервалі 760-780°C. Тому при повільному охолодженні в цьому інтервалі температур або довготривалій витримці при 720°C відбувається друга стадія графітизації. При цьому можливо перетворення аустеніту в перліт із наступним розпадом його цементиту на ферит і графіт, або безпосередній розпад аустеніту на ферито-графітну суміш. Механізм графітизації такий же, як і на першій стадії, тільки графітизація проходить внаслідок переходу вуглецю не через аустеніт, а через ферит від межі ферит-цементит до межі ферит-графіт.

В залежності від повноти графітизації на другій стадії одержують внаслідок відпалення перлітно-феритні або феритні чавуни. Якщо в відливках не проходить друга стадія – перлітні чавуни.

Тривалість першої стадії відпалення складає від 8 до 35 годин, друга стадія триває 12-24 години.

Ковкий чавун маркується згідно ГОСТ 1215-79: КЧ 37-12, КЧ30-6. Перша цифра в марці вказує на мінімальне значення границі міцності на розтяг ($\sigma_{\text{B}} \cdot 10^{-1}$, МПа), а друга – відносне видовження (в %).

Механічні властивості ковкого чавуну в значній мірі залежать від структури матриці, кількості та дисперсності графіту.

Феритний КЧ 37-12, КЧ 30-6 ($\sigma_B=300...360\text{МПа}$) має достатньо високі пластичність (6-12%) та в'язкість. Перлітний КЧ 45-7, КЧ 80-1,5 має більш високу міцність ($\sigma_B=440...780\text{МПа}$), але меншу пластичність ($\delta=7...2\%$).

З ковких чавунів виготовляють деталі машин, що витримують знакозмінні, вібраційні та ударні навантаження: картери редукторів, гаки, штампи холодного деформування.

В таблиці 9.2 наведені деякі марки чавунів, їх хімічний склад та призначення.

Таблиця 9.2 – Хімічний склад та призначення чавунів

Марка чавуну	Вміст елементів, %					Призначення
	C	Si	Mn	$\leq P$	$\leq S$	
<i>Сірі чавуни (ГОСТ 1412–85)</i>						
СЧ 15	3,5-3,7	2,0-2,4	0,5-0,8	0,2	0,15	Відливки картерів, кришок, гальмівних барабанів, корпуси редукторів, радіатори опалення.
СЧ 30	3,0-3,2	1,3-1,9	0,7-1,0	0,2	0,12	Відливки відповідального призначення – блоки та голівки циліндрів, гільз, маховиків в автомобіле- та тракторобудуванні; елементи парових котлів та трубопроводів.
<i>Високоміцні чавуни (ДСТУ 3925-99)</i>						
ВЧ 420-12	2,7-3,8	0,5-2,9	0,2-0,6	0,1	0,02	Обладнання прокатних станів, корпуси парових турбін, гідротурбін, кронштейни тощо.
ВЧ 600-3	3,0-3,6	2,4-2,8	0,4-0,7	0,1	0,02	Для деталей, що працюють при ударних знакозмінних навантаженнях: колінчасті вали, поршні, валки прокатних станів тощо.
<i>Чавуни із вермікулярним графітом (ДСТУ 3926-99)</i>						
ЧВГ 300-4	3,5-3,8	2,2-3,0	0,2-1,6	0,08	0,025	Деталі, що працюють при підвищених циклічних механічних навантаженнях: базові деталі станків, кришки та голівки циліндрів, гальмівні диски високошвидкісних потягів тощо.
ЧВГ 450-1	3,1-3,5	2,0-2,5	0,8-1,2	0,05	0,025	Деталі, що працюють при значних механічних навантаженнях, в умовах тертя, зносу, гідрокавітації: поршні та гільзи ДВЗ, корпуси гідроапаратури високого тиску тощо.

Продовження табл.9.2

Марка чавуну	Вміст елементів, %					Призначення
	C	Si	Mn	≤P	≤S	
<i>Ковкий чавун (ГОСТ 1215–79)</i>						
КЧ 30-6	2,6-2,9	1,0-1,6	0,4-0,6	0,18	0,20	Для деталей, що працюють при статичних та динамічних навантаженнях: шестерні, пальці, кронштейни двигуна, гальмівні колодки тощо.
КЧ 45-7	2,5-2,8	1,1-1,3	0,3-1,0	0,10	0,20	Деталі, що працюють при високих статичних та динамічних навантаженнях: маточини коліс, гальмівні барабани, кришки вальниць колінчастого валу, втулки тощо.

9.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Особливу увагу приділити вивченню фазових та структурних перетворень високовуглецевих сплавів. Засвоїти сутність процесу графітизації. Знати маркування та застосування чавунів.

Підготувати табл. 9.3, 9.4.

9.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Що таке чавун? Як класифікують чавуни?
2. Охарактеризувати основні фази та структурні складові чавунів.
3. Структуроутворення в білому чавуні, його властивості та застосування.
4. Вплив хімічного складу та швидкості охолодження на процес структуроутворення сірого чавуну.
5. Яка діаграма стану описує процес кристалізації сірих чавунів?
6. Що таке модифікування чавунів. Які елементи відносяться до модифікаторів I та II роду.
7. В чому полягають особливості структури вибіленого чавуну, його призначення.
8. Як одержують високоміцні чавуни?
9. З яких чавунів одержують ковкі чавуни? Сутність графітаційного відпалення.

10. Охарактеризувати чавуни з вермікулярним графітом у структурі.

11. Маркування та застосування сірих, високоміцних та ковких чавунів.

9.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Робота виконується на зразках білих, сірих, високоміцних та ковких чавунів (після травлення в 4%-ному розчині азотної кислоти в етиловому спирті). Для дослідження структури використовують оптичні мікроскопи МИМ-7 та альбоми з фотографіями мікроструктур.

9.5 Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

9.6 Порядок виконання роботи

1. Дослідити структуру зразків чавунів. Шляхом порівняння мікроструктури зразків з фотографіями структур різних залізовуглецевих сплавів, що приведені в альбомах, визначити марку чавуну. Заповнити табл. 9.3.

Таблиця 9.3 – Хімічний склад та механічні властивості чавунів

<i>Марка чавуну</i>	<i>Хімічний склад</i>	<i>Механічні властивості</i>

2. Для сірого чавуну за допомогою структурних діаграм визначити кількість кремнію, необхідного для отримання різної металевої основи (при вмісті вуглецю 3%) для двох відливок товщиною 10 та 100 мм. Заповнити таблицю 9.4.

Таблиця 9.4 – Залежність структури чавуну від швидкості охолодження та вмісту кремнію

Товщина відливки, мм	Вміст Si (%) в чавуні із 3,0%С для отримання структури		
	П+Г	Ф+П+Г	Ф+Г
10			
100			

9.7 Зміст звіту

1. Вивчити, зарисувати та описати мікроструктуру, властивості та застосування білих та ковких чавунів. Визначити марки досліджених чавунів.

2. Накреслити графік, описати технологію відпалення білого чавуну з метою одержання перлітного, ферито-перлітного та феритного ковких чавунів.

3. Зарисувати стабільну діаграму Fe-C і політермічний переріз діаграми Fe-C-Si (2% Si). Написати на діаграмі структури та фази.

4. Дослідити, зарисувати та описати структури сірих та високоміцних чавунів, визначити їх марки та хімічний склад.

5. Пояснити вплив Si та швидкості охолодження на структуру сірого чавуну.

6. Описати сутність модифікування сірого чавуну та вплив його на структуру і властивості.

7. Описати умови вибілу сірого чавуну.

9.8 Література

[1] с. 217-224, [3] с. 207-212; [4] с. 165-176; [5] с. 203-222.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи: ознайомитися із впливом легувальних елементів (ЛЕ) на поліморфізм заліза та визначенням структурних класів легованих сталей в стані рівноваги. Освоїти маркування та основи вибору легованих сталей для деталей та інструментів.

10.1 Загальні відомості з теорії

Значна більшість деталей машин та конструкцій повинна мати властивості, яким у повній мірі не відповідають вуглецеві сталі, тому широкого використання набули леговані сталі та спеціальні сплави. Це сплави, що відрізняються від звичайних залізобуглецевих сплавів особливими властивостями, обумовленими їх хімічним складом, особливим способом виробництва, а також способом обробки.

Спеціальні сталі містять легувальні елементи, які вводять в сталь у певних концентраціях для того, щоб змінити її структуру та властивості.

Легувальні елементи застосовують для підвищення конструкційної міцності. Поліпшення механічних властивостей зумовлено впливом легувальних елементів на властивості фериту, дисперсність карбідної фази, розмір зерна. За допомогою легування можна покращити співвідношення між міцністю та в'язкістю, а також значно знизити температуру переходу сталі до крихкого стану. ЛЕ підвищують твердість сталі та збільшують теплостійкість. За допомогою легування підвищується опір зносу та корозії, тобто сталь набуває нових фізичних та механічних властивостей (зносоустійкість, корозійна стійкість, жароміцність, жаростійкість та інше).

Основні легувальні елементи в сталях: Mn, Si, Cr, W, Mo, V, Co, Cu, Ti, Zr, Al, B, Nb, Ni. У деяких сталях легувальними елементами можуть бути також: P, S, N, Se, Te, Pb, Ce, La, Ta та інші.

Деякі легувальні елементи (V, Nb, Ti, Zr, B) можуть відчутно впливати на структуру та властивості сталі при вмісті їх у сотих частках (B – у тисячних частках) процента. Додавання елементів у такій кількості називають *мікролегуванням*.

10.1.1 Вплив легувальних елементів на структуру та властивості сталі

Легувальні елементи розчиняються в основних фазах залізовуглецевих сплавів: фериті, аустеніті, цементиті; утворюють спеціальні карбіди та інтерметаліди.

До елементів, що утворюють карбіди, відносяться: Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Zr. Слід зауважити, що здатність до карбідоутворення зростає у приведеному ряді зліва направо (від заліза до цирконію). Si, Al, Ni, Cu, Co – належать до елементів, що не утворюють карбіди.

Легувальні елементи можуть розчинятися в цементиті, наприклад $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, або утворювати спеціальні карбіди, що виникають за участю карбідоутворювачів та мають відмінну від цементиту формулу та кристалічну ґратку. Встановлено, що в сталях можуть утворюватися такі види карбідів:

– *I група*: $M_3\text{C}$, $M_{23}\text{C}_6$, $M_7\text{C}_3$, $M_6\text{C}$ – мають складні кристалічні ґратки, достатньо легко розчиняються у аустеніті при нагріванні;

– *II група*: $M\text{C}$, $M_2\text{C}$ – мають прості ґратки і називаються фазами втілення, вони кристалізуються з дефіцитом по вуглецю. Фази втілення важче розчиняються в аустеніті, ніж карбіди першої групи.

Усі карбіди мають високу температуру плавлення і велику твердість, при цьому у карбідів другої групи ці показники більше, ніж у карбідів першої групи.

При підвищеному вмісті легувальних елементів можуть утворюватись інтерметалідні фази (Fe_7W_6 , Ni_3Al), які зміцнюють сталі за умови їх дисперсності і рівномірного розподілення в об'ємі зерна.

Елементи, за винятком C, N, H та частково B, утворюють тверді розчини заміщення. При розчиненні легувальних елементів у фериті чи аустеніті вони заміщують атоми заліза. Атоми легувальних елементів відрізняються від атомів заліза за розмірами і створюють напруження у ґратках. При цьому міцність фериту зростає, а пластичність і ударна в'язкість зменшуються (рис. 10.1).

Хром позитивно впливає на механічні властивості сталі: зміцнює ферит та підвищує ударну в'язкість при концентрації 1,5-2,0%. Найбільш цінним, але досить дефіцитним, елементом є нікель, який підвищує міцність та твердість фериту, у той же час не зменшує його в'язкість та суттєво знижує поріг холодноламкості. Марганець та

кремній, що мають відмінну від α -Fe кристалічну ґратку, значно підвищують міцність фериту та різко зменшують його в'язкість.

Надмірне легування знижує запас в'язкості, що полегшує крихке руйнування сталевих виробів. При цьому легувальні елементи можуть перебувати в сталі у складі неметалевих включень, нітридів, оксидів, сульфідів, наявність яких призводить до крихкості сталі.

Більшість легувальних елементів зменшує розмір зерна аустеніту, що сприяє підвищенню роботи розвитку тріщини та зменшенню порогу холодноламкості.

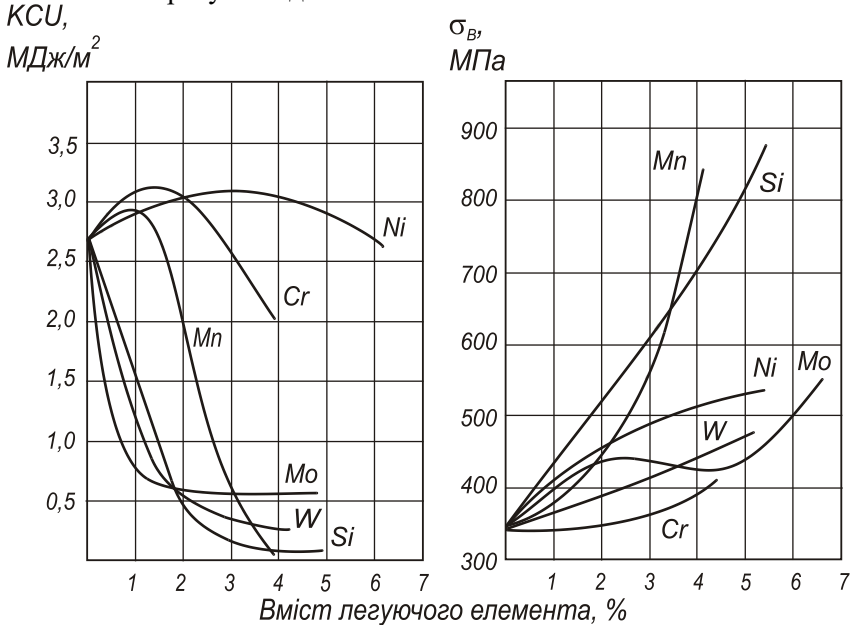


Рисунок 10.1 – Вплив легувальних елементів на властивості фериту

Більшість легувальних елементів зсувають точки S та E на діаграмі Fe-Fe₃C в бік меншого вмісту вуглецю (рис. 10.2). Тому границя між доевтектоїдними, евтектоїдними та заевтектоїдними сталями в легованих сталях зміщується в бік меншого вмісту вуглецю. Так, у сталі з 4%W ледебурит спостерігається при наявності близько 1% вуглецю.

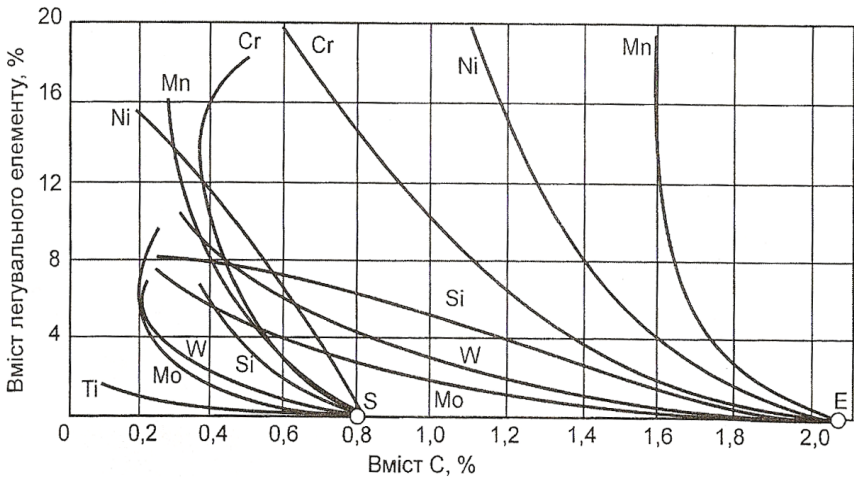


Рисунок 10.2 – Вплив легувальних елементів на положення точок *S* та *E*

За впливом на температуру поліморфних перетворень легувальні елементи можна розподілити на дві групи, кожна з яких, в свою чергу, поділяється на дві підгрупи. На рис. 10.3 показано схему, яка ілюструє класифікацію легувальних елементів відповідно до їх впливу на поліморфізм заліза.

До першої групи належать легувальні елементи, що розширюють γ -область – стабілізатори аустеніту (рис. 10.3, а, б). Розширення γ -області відбувається в тому випадку, якщо легувальний елемент підвищує температури точок лінії A_4 (NJ) і знижує температури точок лінії A_3 (GS). При цьому можливо існування γ -фази у всьому інтервалі концентрацій (відкрита γ -область) і обмеження області γ -фази внаслідок появи нових фаз і утворення гетерогенних зон (розширена γ -область). Отже, легувальні елементи першої групи можна розподілити на дві підгрупи. Елементи першої підгрупи утворюють разом із залізом сплави зі структурою необмеженого гомогенного твердого розчину (рис. 10.3, а). До них належать: нікель, марганець, платина. Елементи другої підгрупи першої групи утворюють із залізом сплави, в яких гомогенна зона обмежується внаслідок утворення нових фаз (рис. 10.3, б). До таких елементів належать вуглець, азот, мідь.

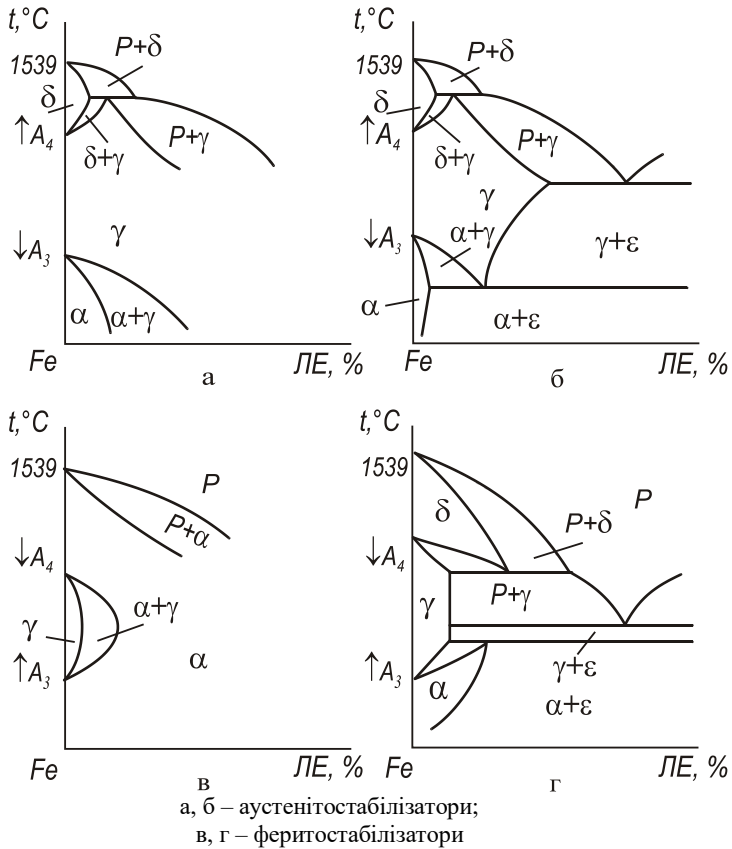


Рисунок 10.3 – Схема діаграм стану „Fe-легувальний елемент”

До другої групи належать легувальні елементи, що розширюють α -область – феритостабілізатори (рис. 10.3, в, г). Розширення α -області відбувається внаслідок того, що температури точок лінії GS підвищуються, а температури точок лінії NJ понижуються. При цьому спостерігається звуження γ -області. При певній концентрації легувального елемента може статися повне замикання γ -області. У цій групі також розрізняють подвійні системи з замкненою γ -областю та гомогенною α -областю (рис. 10.3, в) і системи, в яких α -область обмежена областю гетерогенних структур (звужена α -область, рис. 10.3, г). До першої підгрупи належать такі елементи: берилій,

алюміній, кремній, ванадій, хром, молібден, вольфрам, титан, олово, сурма. До другої підгрупи – бор, цирконій, ніобій.

При легуванні заліза кількома елементами одночасно їх вплив на існування γ - та α -фаз не підсумовується. Наприклад, у потрійній системі Fe-Ni-Cr вплив Ni як γ -стабілізатора перебільшує вплив Cr на стабілізацію α -фази.

10.1.2 Маркування легованих сталей

Марка легованої сталі складається з поєднання букв та чисел, що позначають хімічний елемент та його вміст. Згідно з ГОСТ 4543-71 позначають: *хром – X, нікель – Н, марганець – Г, кремній – С, молібден – М, вольфрам – В, ванадій – Ф, титан – Т, кобальт – К, алюміній – Ю, мідь – Д, ніобій – Б, бор – Р, цирконій – Ц, азот – А (в середині марки), рідкісноземельні метали – ч, Е – селен.*

Число, що стоїть після букви, вказує на середній вміст легувального елемента в цілих процентах. Якщо число відсутнє, то концентрація легувального елемента близько 1,0% (може бути в сотих або в тисячних частках).

Число на початку марки легованої сталі (може бути в сотих або десятих частках процента) вказує на середню концентрацію вуглецю: дві чи три цифри в конструкційних сталях – в сотих частках процента, одна цифра в інструментальних сталях – у десятих частках процента. Якщо кількість вуглецю 1...2%, то цифра на початку марки не ставиться; така сталь є інструментальною (виняток – вальницьві сталі).

Літера “А” в маркуванні, залежно від місця розташування, має різне значення. Якщо ця літера знаходиться в середині марки, вона означає азот, як легувальний елемент. Якщо літера “А” знаходиться на початку марки, вона означає особливу групу сталей – автоматні сталі, тобто сталі, призначені для обробки на металорізальних верстатах – автоматах. Нарешті, літера “А” наприкінці марки означає, що сталь відноситься до категорії високоякісних.

Наприклад, марка конструкційної сталі 12ХНЗА означає, що сталь містить 0,12% вуглецю (0,09-0,16%С), близько 1,0% хрому (0,6-0,9%Cr), близько 3% нікелю (2,78-3,15%Ni), є високоякісною; марка інструментальної сталі ХВСГ – близько 1,0% вуглецю (0,9-1,05%С), близько 1% хрому (0,6-1,1%Cr), близько 1% кремнію (0,65-1,0%Si), марганцю 1,0% (0,6-0,9%Mn).

Треба також зважити на те, що існують окремі випадки маркування. Так, марки вальницьових сталей позначаються буквою “Ш”, швидкорізальні сталі маркуються буквою “Р”, після якої вказується вміст основного легувального елемента – вольфраму в цілих процентах.

Нестандартні сталі позначаються “ЭИ”, що відповідає російській назві “электросталь исследовательская”. Число за цими літерами відповідає порядковому номеру розробки ЭИ437Б.

10.1.3 Класифікація легованих сталей

Класифікація легованих сталей може проводитися за кількома ознаками:

1. *За призначенням*: конструкційні, інструментальні та з особливими властивостями.

2. *За хімічним складом* в залежності від концентрації вуглецю розподіляють: маловуглецеві ($\leq 0,3\%C$); середньовуглецеві ($0,3-0,7\%C$); високовуглецеві ($>0,7\%C$). В залежності від ЛЕ, що введені до складу сталі, розрізняють хромисті, хромонікелеві та інші.

3. *За якістю*: в залежності від присутності шкідливих домішок (сірки, фосфору) сталі якісні, високоякісні та особливо високоякісні.

4. *За структурою* леговані сталі класифікують у відпаленому стані (охладження з піччю).

Сталі у відпаленому (рівноважному) стані можуть мати структури наступних класів: *доевтектоїдні, евтектоїдні, заевтектоїдні, ледебуритні, феритні та аустенітні*.

1. *Доевтектоїдні*, в яких вуглецю менше ніж в т. S, що мають структуру перліт та ферит – наприклад, 12ХН4ВА, 20Х13, 40Х2НМА.

2. *Евтектоїдні*, вміст вуглецю співпадає з т. S, мають структуру перліт – наприклад, 60С2.

3. *Заевтектоїдні*, в яких $t.S < \%C \leq t.E$ мають структуру перліт та карбіди вторинні – наприклад, ХВГ, 9ХС, 70С3А, 40Х13. Структуру необхідно визначати з урахуванням впливу легувальних елементів на точку “S” (див. рис. 10.2). Наприклад, 3% кремнію зсувають точку “S” до $0,6\%C$, і тому сталь 70С3А за структурою заевтектоїдна.

4. *Ледебуритний (карбідний) клас*, вміст вуглецю перевищує т. E, мають структуру $П+K_I+K_{II}$ – наприклад, Х12М, Р6М5, Х12Ф4М, містять вуглецю більш ніж 0,8-2,0% при сумарному вмісті

легувальних елементів $\geq 8\%$. Належність сталі до цього класу визначають з урахуванням впливу легувальних елементів на положення точки E (див. рис. 10.2). Зі зсувом точки "E" вліво частина рідини сплаву кристалізується з утворенням грубої евтектики – ледебуриту. Ледебуритні сталі іноді називають також карбідними, оскільки після гарячої обробки тиском карбідний остов евтектики руйнується і приймає вигляд окремих крупних карбідів.

5. *Сталі феритного класу зі структурою Φ або $\Phi+K$* – наприклад, 08X18T1, 15X25T утворюються при введенні феритостабілізаторів (Cr, Si, W, V, Mo, Ti), що розширюють α -область (див. рис. 10.3, в), при малій кількості вуглецю ($\leq 0,15\%$) γ -область замикається при концентрації легувальних елементів, більшій за точку "C" (див. рис. 10.3, в) та залежать від діаграми стану „*залізо-легувальний елемент*". Так, при кількості хрому понад 14% маловуглецеві сталі ($\leq 0,1\%C$) стають феритними. Особливістю феритних сталей є відсутність поліморфних перетворень при нагріванні, тому вони не змінюють свою структуру.

6. *Сталі аустенітного класу зі структурою A або A+K* – наприклад, 04X18H10, 12X18H9, 15X17AГ14, утворюються при введенні аустенітостабілізаторів (Ni, Mn, N, Cu, Pt), що розширюють γ -область (див. рис. 10.3, а). Вуглець є також аустенітостабілізатором, але його кількість у корозійностійких сталях обмежується 0,15%, бо він знижує корозійну стійкість. До жароміцних сталей аустенітного класу з карбідним зміцненням вводять 0,4-0,45 %C. Аустенітні сталі також не мають поліморфних перетворень і тому не змінюють структуру при нагріванні та охолодженні.

Структуру хромистих сталей системи Fe–Cr–C можна визначити за допомогою структурної діаграми, наведеної на рис.10.4.

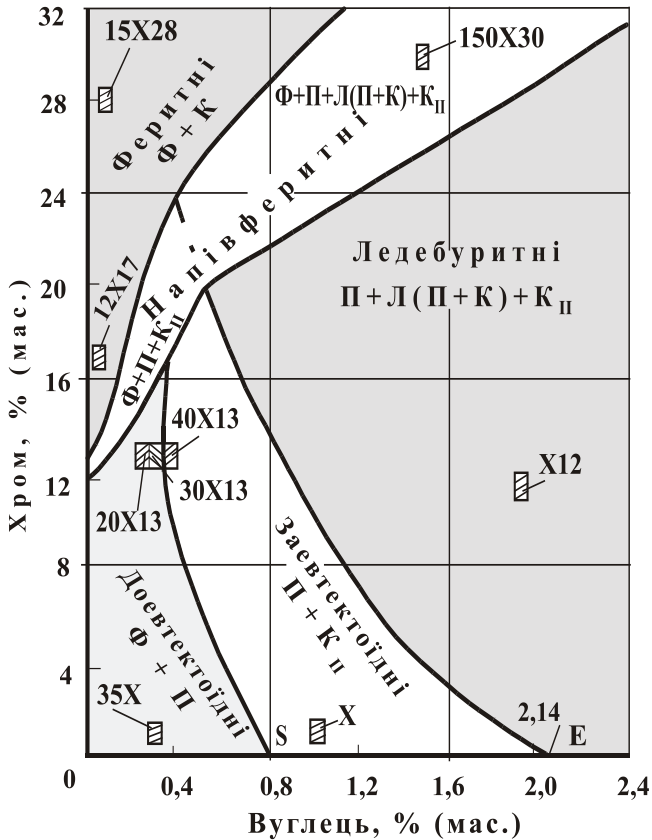


Рисунок 10.4 – Структурна діаграма Fe – Cr – C (стан рівноваги)

При наявності в неіржавіючих сталях як α - так і γ -стабілізаторів її структура може бути визначена за допомогою діаграми Шефлера (рис. 10.5) після розрахунку еквівалентів хрому та нікелю. Якщо у складі неіржавіючої сталі кількість нікелю становить не менше половини від кількості хрому, то її структура аустенітна (наприклад, 08X18N9).

При певній кількості легувальних елементів можлива часткова фазова перекристалізація ($\alpha \rightleftharpoons \gamma$) з утворенням проміжних класів – напівферитного та напіваустенітного.

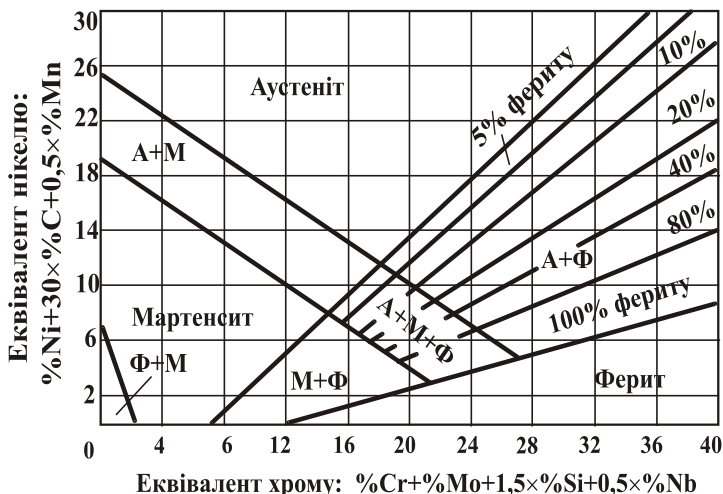


Рисунок 10.5 – Структурна діаграма (діаграма Шеффлера) корозійностійких сталей (нормалізований стан – охолодження на повітрі)

10.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Особливу увагу приділити вивченню впливу легувальних елементів на фазові та структурні перетворення в сталях. Засвоїти класифікацію легованих сталей за структурою у рівноваговому стані та за призначенням. Знати маркування легованих сталей.

Підготувати табл. 10.1.

10.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості до роботи

1. Система маркування легованих сталей. Позначення вуглецю та легувальних елементів в легованих сталях.
2. Роль легувальних елементів в утворенні карбідів в сталях.
3. Вплив легувальних елементів на властивості фаз залізовуглецевих сплавів.
4. Вплив легувальних елементів на положення точок S та E діаграми Fe-Fe₃C.
5. Розподіл легувальних елементів на феритостабілізатори та аустенітостабілізатори.
6. За якими ознаками класифікують леговані сталі ?
7. Класифікація легованих сталей за структурою у відпаленому стані.

10.4 Матеріали, інструменти, прилади та обладнання

Набір зразків легованих сталей різних структурних класів; альбоми з фотографіями мікроструктур; для дослідження структури оптичний мікроскоп МИМ-7.

10.5 Вказівки з техніки безпеки

При виконанні лабораторної роботи дотримуватися правил безпеки, вказаних у додатку А.

10.6 Порядок виконання роботи

1. Переглянути мікроструктуру зразків легованих сталей з різною кількістю легувальних елементів.
2. Використовуючи альбом із мікрофотографіями, визначити структурні класи сталей в рівноважному стані.
3. За допомогою літературних даних та мікроструктур зразків заповнити таблицю 10.1.

Таблиця 10.1 – Визначення структурних класів легованих сталей

Марка сталі	Хімічний склад, %	% вуглецю в точках		Структура в стані рівноваги	Структурний клас в стані рівноваги
		S	E		

10.7 Зміст звіту

1. Стисло описати вплив легувальних елементів на поліморфізм заліза.
2. Стисло описати можливі класи легованих сталей за структурою в умовах рівноваги.
3. Познайомитися з принципом маркування легованих сталей.
4. Зарисувати діаграми стану Fe-Cr, Fe-Ni і описати вплив вуглецю в системах Fe-C-Cr і Fe-C-Ni.
5. Дослідити та зарисувати структури сталей в стані рівноваги.

10.8 Література

[3] с. 243-271, [4] с. 154-164, [5] с. 341-359.

ПРИКЛАД ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ «МЕТАЛОЗНАВСТВО»

1. Накреслити у масштабі метастабільну діаграму Fe-Fe₃C, вказати концентрації усіх характерних точок та температури фазових перетворень. Написати структурні складові в усіх областях діаграми, у квадратних дужках вказати фазовий склад структур.

2. Дати визначення фаз (ферит, аустеніт, цементит) та структурних складових (ледебурит, перліт), вказати їх властивості.

3. У сплаві з **3,5%** вуглецю вказати температурний інтервал первинної кристалізації.

4. Визначити, як змінюється склад рідкої та твердої фаз в інтервалі кристалізації сплаву з **0,45%** вуглецю.

5. В сплаві з **0,12%** вуглецю вказати температури початку і кінця поліморфних перетворень при нагріванні.

6. Записати реакції, що відбуваються в сплавах при температурах нонваріантної рівноваги фаз.

7. Описати кристалізацію сплаву з **3,5%** вуглецю. Зарисувати схематично структуру сплаву при кімнатній температурі та показати на схемі структурні складові. Вказати структурний клас в стані рівноваги.

8. Побудувати криву охолодження для сплаву з **1,0%** вуглецю за допомогою правила фаз. Описати та схематично зарисувати схему мікроструктури цього сплаву при кімнатній температурі. Вказати структурний клас.

9. В сплаві з **0,015%** вуглецю визначити температурні інтервали вторинної чи третинної кристалізації.

10. Порівняти кристалізацію двох однакових за масою сплавів з **3%** та **4%** вуглецю та вказати, в якому з них на кривій охолодження спостерігається більш тривала температурна зупинка. Привести пояснення.

11. Описати перетворення, що відбуваються у сплаві, вміст вуглецю в якому становить **0,8%** при нагріванні від кімнатної температури до лінії ліквідус.

12. Вказати температуру плавлення ледебуриту.

13. В сплаві з **2,0%** вуглецю вказати температуру розчинення фази **Ц_{II}** при нагріванні.

14. Для сплаву з **4,3%** вуглецю визначити концентрацію вуглецю в фазах, що знаходяться в стані рівноваги при температурі **900⁰С**. Якісно охарактеризувати механічні властивості цього сплаву у відпаленому стані.

15. Розрахувати кількість ледебуриту в сплаві з **6,5%** вуглецю при температурі **900⁰С**.

16. Вказати вміст вуглецю в сплавах, структура яких при кімнатній температурі має тільки одну структурну складову.

17. Класифікувати за структурою та якістю конструкційні сталі **ВСт6кп, А12, сталь 80, 08кп**. Вказати вміст вуглецю.

18. Класифікувати за структурою, якістю інструментальні сталі **У8А, У8, У11, У7А**. Вказати вміст вуглецю.

19. Записати марку сталі з вмістом **1,3%** вуглецю, якщо відомо, що сталь високоякісна.

20. У відпаленому стані якісно порівняти механічні властивості сталей **У8** та **20**. Пояснити різницю, враховуючи структуру та фазовий склад.

21. Записати марку конструкційної якісної сталі, якщо кількість перліту в її структурі складає **70%**.

ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ

Сутність запитань єдина для усіх варіантів контрольних робіт, а конкретні значення вихідних даних для кожного варіанту наведені у відповідних таблицях.

Контрольна робота №1

1. Накреслити у масштабі метастабільну діаграму Fe-Fe₃C, вказати концентрації усіх характерних точок та температури фазових перетворень. Написати структурні складові в усіх областях діаграми, у квадратних дужках вказати фазовий склад структур.

2. Дати визначення фаз (ферит, аустеніт, цементит) та структурних складових (ледебурит, перліт), вказати їх властивості.

3. Записати реакції, що відбуваються в сплавах при температурах нонваріантної рівноваги фаз.

4. У сплаві з _____% вуглецю вказати температурний інтервал первинної кристалізації.

5. Визначити, як змінюється склад рідкої та твердої фаз в інтервалі кристалізації сплаву з _____% вуглецю.

6. В сплаві з _____% вуглецю визначити температурні інтервали вторинної чи третинної кристалізації.

7. В сплаві з _____% вуглецю вказати температури початку і кінця поліморфних перетворень при нагріванні.

8. В сплаві з _____% вуглецю вказати температуру розчинення фази _____ при нагріванні.

9. Побудувати криву охолодження для сплаву з _____% вуглецю за допомогою правила фаз. Описати та схематично зарисувати схему мікроструктури цього сплаву при кімнатній температурі. Вказати структурний клас.

10. Описати перетворення, що відбуваються у сплаві, вміст вуглецю в якому становить _____% при _____.

11. Порівняти кристалізацію двох однакових за масою сплавів з _____% та _____% вуглецю та вказати, в якому з них на кривій охолодження спостерігається більш тривала температурна зупинка. Привести пояснення.

12. Теоретичне питання на теми «Кристалізація» та «Пластична деформація та рекристалізація»:

- варіант №1: Рекристалізація: первинна, збиральна та вторинна. Сутність, характеристика структури та властивостей.

- варіант №2: Дислокаційний механізм пластичної деформації та природа зміцнення.

- варіант №3: Критичний розмір зародка при кристалізації. Розмір зерна після кристалізації та фактори, що на нього впливають. Модифікування.

- варіант №4: Пружна та пластична деформації Механізми пластичної деформації. Системи ковзання для металів з ОЦК-, ГЦК- та ГЦП-ґратками. Джерело Франка-Ріда. Поняття наклепу.

- варіант №5: Первинна кристалізація металу; її основні параметри. Дендрити. Будова металевого зливку. Пояснити утворення кожної зони в металевому зливку.

- варіант №6: Дислокаційний механізм пластичної деформації та природа зміцнення.

- варіант №7: Первинна та вторинна кристалізація. Гомогенна та гетерогенна кристалізації.

- варіант №8: Критичний ступінь деформації. Холодна та гаряча пластичні деформації (різниця між ними).

- варіант №9: Охарактеризувати процеси, що відбуваються при нагріванні холоднодеформованого металу: віднова (відпочинок та полігонізація), рекристалізація (первинна).

- варіант №10: Температура початку рекристалізації. Рекристалізаційне відпалення. Критичний ступінь деформації. Від чого залежить розмір рекристалізованого зерна?

Дані до контрольної роботи №1

Номер питання	Номер варіанту									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	3,40	0,80	2,00	0,70	0,16	5,50	1,00	0,30	0,10	2,80
5	1,50	6,00	0,16	0,80	2,80	0,45	4,9	2,0	1,50	0,90
6	6,50	4,30	1,20	1,80	0,60	0,80	0,40	4,00	2,00	5,00
7	0,12	0,20	4,30	1,10	2,10	3,60	0,80	6,00	0,16	0,45
8	2,00; Ц _{II}	0,60; Φ	5,50; A	3,50; Ц _{II}	0,80; Φ	0,50; Ц _{III}	1,80; Φ	0,80; Ц _{III}	1,00; Ц _{II}	2,50; Ц _{III}
9	1,00	3,40	0,16	6,00	4,30	0,80	1,50	0,70	0,30	5,5
10	0,8 % при нагріванні від кімнатної температури до лінії ліквідус	0,16 % при охолодженні від лінії ліквідус до кімнатної температури	4,0 % при нагріванні від кімнатної температури до лінії ліквідус	1,5 % при охолодженні від лінії ліквідус до кімнатної температури	2,1 % при нагріванні від кімнатної температури до лінії ліквідус	3,8 % при охолодженні від лінії ліквідус до кімнатної температури	0,16 % при нагріванні від кімнатної температури до лінії ліквідус	5,5 % при охолодженні від лінії ліквідус до кімнатної температури	3,3 % при нагріванні від кімнатної температури до лінії ліквідус	0,8 % при охолодженні від лінії ліквідус до кімнатної температури
11	3,00 та 4,00	4,00 та 5,00	6,00 та 4,50	2,50 та 4,00	3,00 та 6,00	4,30 та 5,00	5,50 та 4,30	5,00 та 2,20	5,50 та 4,00	3,50 та 2,50

Контрольна робота №2

1. Принцип класифікації та призначення конструкційних вуглецевих сталей. Класифікувати за структурою та якістю конструкційні сталі _____. Вказати вміст вуглецю. Привести приклади використання.

2. Принцип класифікації та призначення інструментальних вуглецевих сталей. Класифікувати за структурою та якістю конструкційні сталі _____. Вказати вміст вуглецю. Привести приклади використання.

3. Записати марку сталі з вмістом ____% вуглецю, якщо відомо, що сталь конструкційна якісна.

4. Записати марку конструкційної якісної сталі, якщо кількість перліту в її структурі складає ____%.

5. Розрахувати кількість ледебуриту в сплаві з ____% вуглецю при температурі ____°C.

6. В відпаленому стані якісно порівняти механічні властивості (НВ, КСЧ, δ , σ_B) сталей _____ та _____. Пояснити різницю, враховуючи структуру та фазовий склад.

7. Розшифрувати хімічний склад таких марок сталей: _____. Класифікувати їх за якістю, призначенням. Вказати структуру та структурний клас в рівноважному стані.

8. **Теоретичне питання на тему «Вуглецеві та леговані сталі»:**

- варіант №1: Вплив вуглецю і постійних домішок на властивості сталей.

- варіант №2: Вплив легувальних елементів на структуру та деякі властивості сталей. Характеристика фаз в легованих сталях.

- варіант №3: Елементи карбідо- та некарбідоутворювачі. Вплив легувальних елементів на поліморфні перетворення (ферито- та аустенітостабілізатори). Вплив легувальних елементів на властивості фериту.

- варіант №4: Особливості мікроструктур сталей: відманштеттова структура до- та заевтектоїдних сталей, аномальна структура.

- варіант №5: Вплив легувальних елементів на властивості фериту. Принцип маркування легованих сталей..

- варіант №6: Особливості мікроструктур сталей: відманштеттова структура до- та заевтектоїдних сталей, феритна смугастість, рядкові структури.

- варіант №7: Вплив вуглецю і постійних домішок на властивості сталей.

- варіант №8: Вплив легувальних елементів на концентраційні точки S та E діаграми стану Fe-Fe₃C. Класифікація легованих сталей за вмістом вуглецю та якістю. Структурні класи легованих сталей в рівноважному стані.

- варіант №9: Фази в металевих системах: тверді розчини, проміжні фази постійного і змінного складу. Класифікація проміжних фаз згідно Курнакову.

- варіант №10: Особливості мікроструктур сталей: феритна смугастість, рядкові структури, зневуглецювання.

9. Теоретичне питання на тему «Чавуни»:

- варіант №1: Стабільна діаграма стану «залізо-вуглець». Умови утворення графіту. Сірі чавуни. Структура, властивості, призначення. Маркування.

- варіант №2: Модифікування. Високоміцні чавуни. Маркування. Структура, властивості, призначення.

- варіант №3: Чавуни. Білі чавуни. Структура, властивості. Чавун із вермікулярним графітом.

- варіант №4: Високоміцні чавуни. Модифікування. Чавуни із вермікулярним графітом. Структура, властивості, маркування та призначення високоміцних чавунів та чавунів з вермікулярним графітом.

- варіант №5: Ковкі чавуни. Графітизаційне відпалення відливок із білого чавуну. Структура, властивості та призначення ковких чавунів. Маркування.

- варіант №6: Стабільна діаграма стану «залізо-вуглець». Сірі чавуни. Структура, властивості, призначення. Маркування. Вибіл чавунів. Половинчасті чавуни.

- варіант №7: Високоміцні чавуни. Чавуни із вермікулярним графітом. Маркування високоміцних чавунів та чавунів з вермікулярним графітом. Їх структура, властивості, призначення.

- **варіант №8:** Ковкі чавуни. Графітізаційне відпалення відливок із білого чавуну. Структура, властивості та призначення ковких чавунів. Маркування.

- **варіант №9:** Чавуни. Білі чавуни. Структура, властивості. Вибіл чавунів. Половинчасті чавуни. Модифікування чавунів.

- **варіант №10:** Білі чавуни. Структура, властивості. Ковкі чавуни, їх отримання. Структура, властивості та призначення ковких чавунів. Маркування.

Дані до контрольної роботи №2

Номер питання	Номер варіанту									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	A20, сталь 60, BCT4кп, 10	BCт6, A30, сталь 20, 60	BCт5пс, A12, сталь 08кп, 55	AC14, CT3кп, сталь 65, 05кп	BCт2кп, 35, сталь 70, A20	A20, сталь 50, 30, Cт0	15, сталь 80, A30, BCт5	BCт3пс, 10кп, A40, сталь 45	25, сталь 55, Cт4кп, A30	AC14, сталь 70, 15, BCт3пс
2	У11, У8А, У13, У13А	У9, У10А, У10, У7	У13, У11А, У8, У10	У7, У9А, У11А, У13	У13, У12А, У8, У8А	У7, У8, У9, У10А	У10, У10А, У12, У7	У13А, У13, У8, У9А	У12А, У7, У12, У9	У12, У7А, У11А, У8
3	0,45	1,20	0,20	0,80	0,70	1,30	0,55	0,70	0,30	1,00
4	30	80	10	60	70	40	40	55	25	100
5	6,0; 750	3,0; 1100	5,0; 1100	5,5; 800	4,0; 950	3,8; 900	5,5; 1000	3,5; 800	2,5; 900	6,5; 1000
6	У8 та У13А	20 та У8А	У7А та У13А	08кп та У8	45 та 70	У10 та У13	У7 та 15	У9А та 25	50 та 80	У8 та У7А
7	ХВГ, 12Х18Н10Г, 18ХГТ	ШХ15СГ, 38Х2МЮА, Х6ВФ	65С2ВА, 20Х13, P9M5K5	ШХ4, P18, 37Х12Н8Г8 МФБ	45Х14Н14В2 М, 9ХС, 40ХН	P9, 25ХГМ, 40Х13	35ХГСА, 95Х18, Х12ВМ	ХХФА, 20Х23Н18, 3Х2В8Ф	7ХГ2ВМ, 30Х13, 18Х2Н4МА	65Г, 15Х28, 4Х5МФС

ЛІТЕРАТУРА

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Потітехніка», 2001. – 375 с.
2. Папилов Я.Я., Зайцева Л.П. Электрополирование и электроотравление металлографических шлифов/ Папилов Я.Я., Зайцев Л.П. М.: Металлургия, 1962. – 410 с.
3. Лившиц В.Г. Металлография / Лившиц В. Г. – М.: Металлургия, 1990. – 450 с.
4. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Лахтин Ю.М.– М.: Металлургия, 1984. – 359 с.
5. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – 360 с.
6. Афтандіянц Є.Г. Матеріалознавство: підручник / Є.Г. Афтандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. – Київ: Вища освіта, 2012. – 548 с.
7. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография/ Салтыков С.А.. – М.: Металлургия, 1958. – 450 с.
8. Натапов Б.С. Термическая обработка металлов: [учеб. пособие для вузов] / Натапов Б.С. – Киев: Вища школа, 1980. – 288 с.
9. Геллер Ю.А. Материаловедение (методы анализа, лабораторные работы и задачи)/ Ю.А. Геллера, А.Г. Рахштадт. – М: Металлургия, 1983. – 384с.
10. Матеріалознавство: підручник / [Дяченко С.С., Дощечкіна І.В., Мовлян О.А. та ін.]; під ред. С.С. Дяченко – Харків.: ХНАДУ, 2007. – 440 с.

Додаток А

Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт із дисципліни “металознавство” в лабораторіях кафедри фізичного матеріалознавства

1. Практична частина лабораторних робіт виконується студентами лише в присутності викладача або лаборанта.
2. Перед проведенням лабораторних робіт студенти повинні звернути увагу на небезпечні та шкідливі фактори за вказівкою викладача.
3. При шліфуванні та поліруванні зразків необхідно користуватися окулярами для запобігання травмування очей.
4. Якщо при поліруванні зразок вирвано із рук, негайно відключити верстат від електричної мережі.
5. При травленні зразків у водних або спиртових розчинах лугів, солей, кислот остерігатись їх попадання на відкриту шкіру та очі. Якщо це трапилось, необхідно промити забруднені місця водою.
6. Після закінчення роботи на металографічному мікроскопі МИМ-7 вимкнути мікроскоп із електромережі, закрити чохлами та вимкнути головний рубильник.
7. По завершенні практичної частини лабораторної роботи необхідно відключити обладнання від електричної мережі.
8. У випадку загорання в лабораторії вжити заходи по його усуненню за допомогою первинних засобів пожежегасіння. Коли це не можливо, студенти повинні покинути лабораторію, а викладач зобов'язаний вжити усіх заходів по гасінню пожежі і сповістити адміністрацію.