

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Модуль №1 «Матеріалознавство»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня

вищої освіти ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

денної та заочної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв – 2024

УДК 620.17:63
М34

Друкується за рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, протокол № 3 від 13.11.2024 р.

Укладачі:

Полянський П. М. – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін МНАУ.

Іванов Г. О. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін МНАУ.

Степанов С. М. – ст. викладач кафедри загальнотехнічних дисциплін МНАУ.

Рецензенти:

Марченко Д. Д. – канд. техн. наук, доцент, заступник декана з навчальної роботи інженерно-енергетичного факультету, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу МНАУ.

Лимарь О.О. канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу МНАУ.

© Миколаївський національний аграрний
університет, 2024

План модуля 1. «Матеріалознавство»:

1. Загальні поняття про метали.

Класифікація металів. Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри.

Типи зв'язків в кристалічних і поліморфних речовинах. Загальні поняття про дефекти кристалічної будови кристалів.

Термодинамічні основи фазових перетворень металів. Алотропія металів. Ізотропія, анізотропія в кристалах і металах. Процеси кристалізації в металах і вплив зовнішніх факторів на їх протікання. Кристалічно-дендритна будова зливка. Поняття про механічні, фізичні, хімічні та технологічні властивості металів та сплавів.

2. Теорія сплавів.

Основні поняття: сплав, система, компонент, фаза. Механічні суміші. Тверді розчини. Хімічні сполуки. Особливості кристалізації сплавів за Черновим Д.К. Правило фаз. Закон Гіббса. Правило відрізків.

Методи побудови діаграм стану сплавів. Основні типи діаграм стану сплавів: з евтектикою чистих компонентів, з евтектикою твердих розчинів, з утворенням хімічних сполук, з необмеженою розчинністю компонентів.

3. Залізовуглецеві сплави.

Залізо і його взаємодії з вуглецем «Діаграма стану сплаву залізо-вуглець», фазовий склад, структурні складові залізовуглецевих сплавів та їх властивості.

Вуглецеві сталі, їх склад, структура і властивості залежно від вмісту постійних домішок Класифікація і маркування вуглецевих сталей і їх використання в машинобудуванні. Машинобудівні чавуни. Вплив домішок на структуру і властивості чавуну. Процеси графітизації в чавунах. Класифікація і маркування чавунів. Леговані чавуни та їх призначення.

Вступна лекція.

Матеріалознавство і ТКМ - наука, яка вивчає склад, структуру та властивості металів та їх сплавів, а також зміну цих властивостей під впливом температури, механічних і хімічних дій. Вона об'єднує металознавство та науку про неметалеві матеріали.

Матеріалознавство і ТКМ відноситься до числа базових дисциплін для інженерних спеціальностей. Це пов'язано з тим що отримання, розробка нових матеріалів, способи їх обробки є основою сучасного виробництва і багато в чому визначають рівнем свого розвитку науково-технічного і економічного потенціалу країни. Проектування раціональних, конкурентоспроможних виробів, організація їх виробництва неможливі без достатнього рівня знань в області матеріалознавства.

Матеріалознавство і ТКМ є основою для вивчення багатьох спеціальних дисциплін. Різноманітність властивостей матеріалів є головним фактором, які зумовлюють їх широке застосування в техніці.

Теоретичною основою матеріалознавства є відповідні розділи фізики та хімії. У матеріалознавстві широко використовують сучасні структурні дослідження, фізичні та механічні випробування. Завдяки цьому, а також беручи до уваги економічні розрахунки, можна обґрунтовано визначити доцільність застосування того чи іншого матеріалу в певних умовах експлуатації.

Основними матеріалами, які використовуються є і ще довго будуть залишатися метали та їх сплави. Тому основною частиною матеріалознавства є металознавство, в розвитку якого, провідну роль зіграли вчені: Аносов П.П., Чернов Д.К., Курнаков Н.С., Гуляєв А.П. та інші.

Метою викладання дисципліни є навчити інженерів застосовувати основні методи зміни властивостей матеріалів і проводити обґрунтований вибір матеріалу для виробів з урахуванням умов їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети при вивченні дисципліни вирішуються наступні основні **завдання**: отримання знань з оцінки технічних властивостей матеріалів, виходячи з умов експлуатації та виготовлення виробів; формування науково-обґрунтованих уявлень про можливості раціонального зміни технічних властивостей матеріалу шляхом зміни його структури; ознайомлення зі способами зміцнення матеріалів, що забезпечують надійність виробів та інструментів; ознайомлення з основними групами сучасних матеріалів, їх властивостями і сферою застосування.

На момент початку вивчення модуля «Матеріалознавство» студентам необхідно знання наступних понять: навантаження, напруга, деформація пружна і пластична, робота, енергія, агрегатний стан речовини, термодинамічна система, параметри термодинамічної системи, внутрішня енергія, атомно-кристалічна будова металів, типи зв'язків частинок у твердому тілі, основні фізичні властивості металів. Матеріалознавство і ТКМ готує студента до вивчення спеціальних дисциплін які вивчають основні виробничі технології і процеси. Знання основ матеріалознавства і ТКМ необхідно інженеру який працює у сфері експлуатації сучасних машин та конструкцій.

МОДУЛЬ 1 «МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

Класифікація металів. Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри. Загальні поняття про дефекти кристалічної будови кристалів. Типи зв'язків в кристалічних і поліморфних речовинах.

Загальні поняття про метали. Класифікація металів.

Вміст елементів в Земній корі. Історично для техніки найбільш важливими були метали і сплави, в першу чергу сталь, чавун і мідь. Вміст металів і елементів в Земній корі наступні: Мідь $Cu = 0,01\%$, Срібло $= 4 \cdot 10^{-6}\%$, Олово $= 6 \cdot 10^{-4}\%$, Титан $= 0,58\%$, Магній $= 1,94\%$, Золото $= 5 \cdot 10^{-7}\%$, Берилій $= 5 \cdot 10^{-4}\%$, Цинк $= 2 \cdot 10^{-2}\%$, Залізо $= 4,7\%$, Алюміній $= 7,5\%$, Кремній $= 25,7\%$, Свинець $= 8 \cdot 10^{-4}\%$, Хром $= 3,3 \cdot 10^{-2}\%$, Нікель $= 1,8 \cdot 10^{-2}\%$. Аналіз наведених даних показує, що найбільш перспективним елементом для використання в техніці є алюміній, це збігається з загальносвітовою тенденцією машинобудування. Зусилля розробників нових матеріалів спрямовані на створення матеріалів на основі тугоплавких сполук: нітридів і боридів в кристалічній і аморфній формах, придатних для застосування. Найбільшого поширення в авіаційній, космічній і спеціальній техніці набуває нітрид кремнію (SiN). Так як матеріальні ресурси Землі обмежені, це знаходить своє відображення в формуванні цін, перед машинобудуванням завжди стоїть завдання розширення сировинної бази та скорочення витрат матеріалів на одиницю техніки.

Із відомих 106 хімічних елементів 83 – метали. В періодичній системі метали розташовані зліва від ступінчатої лінії, проведеної від бора (B) до астату (At) (табл. 1).

Металами називають речовини, які мають кристалічну будову, металевий блиск, добру пластичність, високу електро- і теплопровідність. Найбільш поширеними в природі металами є алюміній (8,8% маси земної кори) та залізо (4,6%).

В промисловості в основному використовують сплави, адже до рідкого металу можна вводити певну кількість хімічних елементів і отримувати сплави з необхідними властивостями.

Умовно метали поділяють на чорні і кольорові.

До **чорних** металів відноситься залізо та сплави на його основі – сталь і чавун. Сталі і чавуни є основними в машинобудуванні завдяки порівняно невисокій вартості та добрим технологічним і механічним властивостям. Але вони мають невисоку корозійну стійкість та високу їх питому вагу.

Кольоровими вважаються всі інші метали, крім чорних. Найбільше застосування мають алюміній, мідь, магній, титан, цинк, свинець, олово, нікель, молібден, вольфрам, кобальт, тантал, цирконій, ніобій. Здебільшого кольорові метали застосовуються у вигляді сплавів.

Метали і сплави людство застосовує дуже давно. Мідь, золото і срібло застосовуються уже більше 8 тис. років, як знаряддя праці та прикраси.

Вчені доводять, що залізо використовується понад 3 тис. років. На території України залізо відоме з VII-V ст. до н. е.

На виробництві наряду з металами широко застосовуються неметалеві будівельні та полімерні матеріали.

Будівельні матеріали поділяють на матеріали загального (цемент, бетон, лісоматеріали) та спеціального призначення (теплоізоляційні, гідроізоляційні, вогнетривкі матеріали). Ці матеріали людство використовує від початку свого існування. Так древні єгиптяни застосовували гіпс і вапняні розчини при будівництві пірамід. В Києві вапно використовували уже в X ст. під час будівництва Десятинної церкви. В XI ст. при будівництві Софіївського собору застосовували суміш вапна з товченою цеглою.

Полімерні матеріали є новим видом конструкційних матеріалів. Вони мають достатню міцність, високу корозійну стійкість, низьку теплопровідність та ряд інших цінних фізико-механічних властивостей, які обумовлюють їх широке застосування.

За основною класифікацією всі метали діляться на дві великі групи - чорні та кольорові метали.

Де:

Чорні - метали які мають темно-сірий колір, більшу щільність (крім лужноземельних), високу температуру плавлення, відносно високу твердість і в багатьох випадках мають поліморфізм. Найбільш типовим металом цієї групи є залізо.

Кольорові - метали які мають характерну забарвлення: червоне, жовте, біле. Володіють великою пластичністю, малої твердість, відносно низькою температурою плавлення, для них характерна відсутність поліморфізму. Найбільш типовим металом цієї групи є мідь.

Чорні метали у свою чергу можна підрозділити так:

Залізні метали - залізо, кобальт, нікель (так звані феромагнетики) і близький до них за властивостями марганець. Кобальт, нікель і марганець часто застосовують як добавки до сплавів заліза, а також як основу для відповідних сплавів, по подібних за своїми властивостями на високолеговані сталі.

Тугоплавкі метали, температура плавлення яких вище ніж заліза (тобто вище 1539 ° C). Застосовують як добавки до легованих сталей, а також як основу для відповідних сплавів.

Уранові метали - актиноїди, що мають переважне застосування в сплавах для атомної енергетики.

Рідкоземельні метали (РЗМ) - лантан, церій, неодим, празеодим та ін. що об'єднуються під назвою лантаноїдів, і подібні з ними за властивостях ітрій і скандій. Ці метали володіють дуже подібними хімічними властивостями, але дуже різними фізичними (температура плавлення і ін.). Їх застосовують як домішки до сплавів інших елементів. У природних умовах вони зустрічаються разом і внаслідок труднощів поділу на окремі елементи для присадки зазвичай застосовують «змішаний сплав», так званий мішметал. Мішметал (нім. Mischmetall - лігатура, сплав) - сплав елементів церієвої групи, містить 40-60% Ce (церій), 15-25% La (лантан), 15-17% Nd (неодим) і 8-10% ін. елементів: до 2% Fe (заліза) і 0,1-0,3% Si (кремнію). До таких змішаним сплавів РЗМ

відносять фероцерій (феросплав, що містить, %: Ce (церій) 40-45; La 18-25(лантан); Nd 10-12 (неодим); Pr (празеодим) 5-7; Fe (залізо) не більше 15. Фероцерій - пірофорний сплав тобто сплав, що дає іскру при терті), дідім (сплав неодіму і празеодіма переважно) та ін.

Лужноземельні метали у вільному металевому стані не застосовуються, за винятком особливих випадків (Наприклад: теплоносій в атомних реакторах).

Кольорові метали поділяються на:

Легкі метали - берилій, магній, алюміній, що володіють малою щільністю.

Шляхетні метали - срібло, золото, метали платинової групи (платина, паладій, іридій, родій, осмій, рутеній). До них може бути віднесений і «напівшляхетний» мідь. Мають високу стійкість проти корозії.

Легкоплавкі метали - цинк, кадмій, ртуть, олово, свинець, вісмут, талій, сурма і елементи з ослабленими металевими властивостями - галій, германій.

За будовою електронних оболонок метали прийнято поділяти на нормальні та перехідні. У нормальних металів внутрішні електронні оболонки (рівні) повністю заповнені. До таких металів відносять Na, Cu, Mg, Al, Pb та ін. У перехідних металів внутрішні p і d оболонки недобудовані. Найхарактерніші представники перехідних металів Fe, Pd, Pt і їм подібні.

Фізична сутність процесу кристалізації.

Будь-яке речовина може перебувати в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому і газоподібному. Четвертий агрегатний стан плазма – сильно іонізований газ (газ заряджених частинок – іонів та електронів) який утворюється при високих температурах (більше ніж 10^5 K). Перехід з одного стану в інший відбувається при певній температурі (температура фазового переходу), яка називається температурою плавлення або кипіння. У газах відсутня закономірність у розташуванні частинок, частинки рухаються хаотично, причому газ прагне зайняти, можливо, більший об'єм. Тверді кристалічні тіла мають правильну будову, при якому атоми і іони знаходяться у вузлах кристалічних ґраток (так званий ближній порядок), а окремі осередки і блоки певним чином орієнтуються по відношенню один до одного (дальній порядок). У рідинах певна орієнтування поширюється не на весь обсяг, а лише на невелике число атомів, що утворюють порівняно стійкі угруповання чи флуктуації. Зі зниженням температури стійкість флуктуації збільшується, і вони виявляють здатність до зростання. Таким чином, для рідин характерний тільки ближній порядок розташування атомів. У міру збільшення температури твердого тіла зростає рухливість атомів у вузлах решітки, амплітуда коливань збільшується і при досягненні певної температури, так званої температури плавлення, атоми вириваються з вузлів і ґрати руйнуються з утворенням рідкої фази. Температура плавлення - важлива константа і входить у всі довідники: температура плавлення ртуті мінус 38,9; свинцю 327; цинку 419; алюмінію 660; міді 1083; заліза 1539 ° C і т.д.

Таблиця 1. Таблиця Менделєєва.

3 Li Літій	4 Be Берилій														
11 Na Літій	12 Mg Берилій	13 Al Алюміній													
19 K Калій	20 Ca Кальцій	21 SC Скандій	22 Ti Титан	23 V Ванадій	24 Cr Хром	25 Mn Марганець	26 Fe Залізо	27 Co Кобальт	28 Ni Нікель	29 Cu Мідь	30 Zn Цинк	31 Ga Галій	32 Ge Германій	33 As Миш'як	
37 Rb Рубідій	38 Sr Стронцій	39 Y Ітрій	40 Zr Цирконій	41 Nb Ніобій	42 Mo Молібден	43 Tc Технецій	44 Ru Рутеній	45 Rh Родій	46 Pd Палладій	47 Ag Срібло	48 Cd Кадмій	49 In Індій	50 Sn Олово	51 Sb Сурма	
55 Cs Цезій	56 Ba Барій	57-71 Лантаноїди	72 Hf Гафній	73 Ta Тантал	74 W Вольфрам	75 Re Реній	76 Os Осмій	77 Ir Іридій	78 Pt Платина	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Талій	82 Pb Свинець	83 Bi Вісмут	
87 Fr Францій	88 Ra Радій	89-103 Актиноїди	Чорні метали ←				→ Кольорові метали								

Лужно-земельні метали

Легкі метали

Тугоплавкі метали

Залізні метали

Шляхетні метали

Легкоплавкі метали

Рідкоземельні метали

Уранові метали

Протилежна картина спостерігається при охолодженні рідин і її наступному затвердінні. При охолодженні рідин, навпаки, рухливість атомів падає, і поблизу температури плавлення утворюються угруповання атомів, в яких атоми упаковані, як в кристалах. Ці угруповання є центрами кристалізації або зародками. При досягненні температури плавлення - затвердіння, знову утворюються кристалічна решітка, і метал переходить у твердий стан.

Перехід металів з рідкого в твердий стан при визначеній температурі називається *кристалізацією*.

Розглянемо енергетичні умови процесу кристалізації.

Енергетичне стан будь-якої системи характеризується певним запасом внутрішньої енергії, яка складається з енергії руху молекул, атомів, електронів, внутрішньої енергії, енергії пружних спотворень кристалічної решітки та інших видів енергії. Вільної енергією є така складова внутрішньої енергії, яка в ізотермічних умовах може бути перетворена в роботу. Вільна енергія змінює свою величину при зміні температури, плавленні, поліморфних перетвореннях і т. д. $F = U - TS$, де F - вільна енергія, U - повна внутрішня енергія системи, T - температура, S - ентропія. Згідно з другим законом термодинаміки, всяка система прагне до мінімального значення вільної енергії. Будь-який поточний процес йде тільки в тому випадку, якщо новий стан більш стійкий, тобто володіє меншим запасом вільної енергії. Наприклад, кулька прагне скотитися вниз по похилій площині, знизивши при цьому свою вільну енергію, природно, що мимовільне повернення кульки вгору по похилій площині неможливо, так як при цьому прозійде збільшення його вільної енергії. Процес кристалізації підкоряється цьому ж закону. Метал твердне, якщо меншою вільної енергією володіє твердий стан, і плавиться в тому випадку, коли меншою вільної енергією володіє рідкий стан. Зміна вільної енергії рідкого і твердого стану при зміні температури наведено на рис. 1. З підвищенням температури величина вільної енергії обох станів зменшує, але закон зміни вільної енергії різний для рідкого і твердого станів речовини. Розрізняють теоретичну і фактичну температуру кристалізації. T_S теоретична або рівноважна температур, кристалізації, при якій $F_r = F_{тв}$. При цій температурі рівноважного існування металу, як в рідкому так і в твердому станах. Реальна ж кристалізація почнеться тільки тоді, коли цей процес буде термодинамічно вигідний системі, за умови $\Delta F = F_r - F_{тв}$, для чого необхідно якийсь переохолодження.

Температура, при якій практично йде кристалізація, називається фактичною температурою кристалізації $T_{кр}$. Різниця між теоретичною і фактичною температурою кристалізації називається ступенем переохолодження: $\Delta T = T_s - T_{кр}$. Чим більше ступінь переохолодження ΔT тим більше різниця вільних енергій ΔF , тим інтенсивніше буде йти кристалізація. Термічні криві, що характеризують процес охолодження з різними швидкостями, наведені на рис. 2. При повільному охолодженні, відповідному кривої v_1 ступінь переохолодження невелика і кристалізація протікає при температурі, близької до рівноважної (рис. 3). Горизонтальна майданчик на термічній кривій пояснюється виділенням прихованої теплоти кристалізації, яка компенсує відвід тепла. Із зростанням швидкості охолодження (криві v_2, v_3)

ступінь переохолодження зростає і процес кристалізації протікає при все більш нижчій температурі. Крім швидкості охолодження, ступінь переохолодження залежить від чистоти металу. Чим чистіше метал, тим вище ступінь переохолодження. Ще Д. К. Черновим було встановлено, що процес кристалізації складається з двох елементарних процесів: 1) зародження центрів кристалізації, 2) зростання кристалів з цих центрів. При температурах, близьких до температури затвердіння, в рідкому металі утворюються невеликі угруповання атомів, так звані флуктуації, в яких атоми упаковані так само, як в твердих кристалах. З частини цих флуктуації утворюються зародки або центри кристалізації. Зі збільшенням ступеня переохолодження зростає число центри кристалізації.

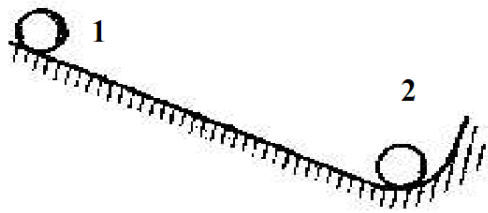


Рис. 1. Вплив температури на зміну вільної енергії рідкого і твердого металу

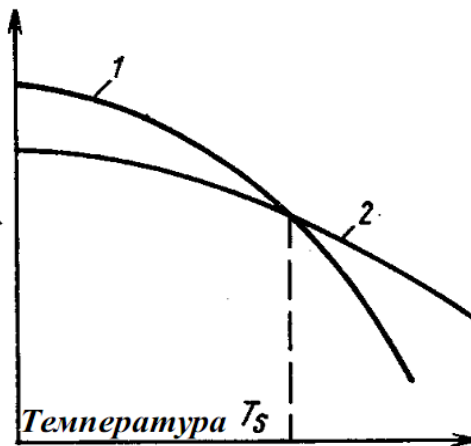
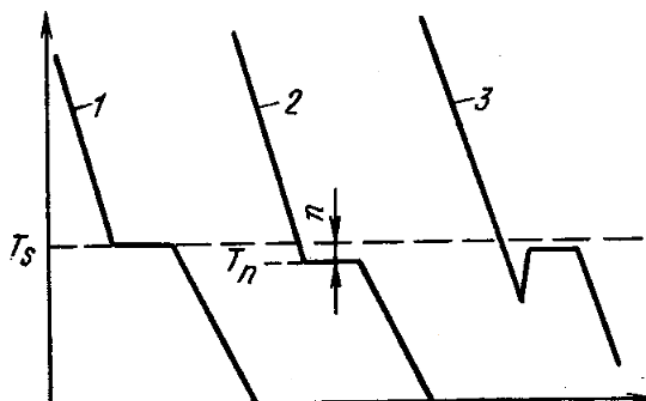


Рис. 2. Температурні криві кристалізації металу з різними швидкостями охолодження



Мал. 3. Криві охолодження при кристалізації

Кількість зерен буде збільшуватись і вони будуть дрібнішими, якщо до рідкого металу перед початком кристалізації ввести дрібні тугоплавкі частинки нітридів, карбідів і силіцидів металів. Таке введення штучних центрів кристалізації називається модифікацією сплаву чи металу.

Кристалізація металів. теоретичні основи та механізм первинної кристалізації

Відомо, що всі речовини можуть знаходитися у трьох агрегатних станах (не враховуючи плазмового): твердому, рідкому і газоподібному. При цьому твердому агрегатному стану можуть відповідати два фазових: кристалічний (структурно-упорядкований) і аморфний (структурно-безпорядковий, або структурно-рідкий). Саме у процесі кристалізації і утворюється кристалічно-фазовий стан.

Фазою називається однорідна частина системи, яка відділена від решти частин поверхнею розділу, при переході через яку хімічний склад і структура змінюються стрибкоподібно.

Первинна кристалізація металів.

Під первинною кристалізацією речовини розуміють процес її переходу із рідкого стану у твердий структурно-упорядкований. На відміну від аморфних тіл, що затвердіють поступово, по мірі охолодження і не утворюючих упорядкованої структури речовини, яка кристалізується, виявляє на кривій охолодження температурну зупинку, яка і відповідає температурі кристалізації (T_k).

Теоретичні основи первинної кристалізації.

Горизонтальна ділянка АВ на кривій кристалізації (зупинка у падінні температури) пояснюється виділенням прихованої теплоти кристалізації, яка компенсує виділення тепла у навколишнє середовище.

Процес кристалізації – це фазовий перехід, і обумовлений він, як і всяке фазове перетворення, переходом речовини із енергетично менш стійкого стану у більш стійкий при даних зовнішніх умовах.

Стійкість (стабільність) стану системи характеризується величиною вільної енергії (F), що називається також термодинамічним потенціалом. Чим менша F , тим більш стійкий стан системи. Величина F , якщо перетворення здійснюються з невеликою зміною об'єму, визначається за формулою: $F=U - TS$ (1), де U – повна (внутрішня) енергія системи, T – абсолютна температура, S – ентропія.

Внутрішня енергія системи U визначається сумою кінетичної і потенціальної енергії і її частин. У ізольованій від зовнішніх впливів системі $U=\text{const}$.

Вільна енергія F – це та частина повної енергії системи, яка зворотно змінює свою величину при зміні температури, фазових переходах і т. д.

Ентропія S – це функція стану системи, яка служить мірою безладу у розташуванні утворюючих її елементів (частин). Наприклад, при нагріванні тіла S зростає, зростає при цьому і схильність до без порядкового розташування у ньому атомів (іонів).

Величина TS називається зв'язаною енергією. Очевидно, що у ізольованій системі збільшення ентропійної складової TS приводить до зменшення вільної

енергії системи, тобто до переходу її у більш стійкий енергетичний стан. Із співвідношення (1) і пояснення до нього випливає, що зростання температури повинно приводити до зменшення вільної енергії системи як у твердому, так і у рідкому стані. Проте інтенсивність падіння F різна для рідкої і твердої фаз.

В точці, де перетинаються криві має місце рівність $F_{ТВ}=F_{Ж}$, що обумовлює співіснування цих фаз – стан рівноваги. Температура, яка відповідає цій точці (T_s) називається критичною температурою фазового переходу (рівноважна температура). Видно, що при T_0 Ступінь переохолодження залежить від швидкості охолодження речовини при кристалізації.

Термічні криві, які характеризують процес кристалізації чистих металів при охолодженні з різною швидкістю. Видно, що зі збільшенням швидкості охолодження ступінь переохолодження при кристалізації зростає. Ступінь переохолодження залежить також від природи і чистоти речовини і, зокрема, метала. Чим чистіший рідкий метал, тим більше він схильний до переохолодження. При затвердінні дуже чистих металів ступінь переохолодження може бути достатньо високий (для олова, наприклад, була досягнена $\Delta T=118^\circ$, для суми $\Delta T=135^\circ$). Проте частіше ΔT складає $20-30^\circ$.

Механізм кристалізації

Процес кристалізації металів і, зокрема, розплавленої сталі, вивчав Д.К. Чернов і за результатами його досліджень було виявлено, що він складається із двох стадій: утворення зародків (центрів) кристалізації і зростання цих центрів, при цьому обидва ці процеси йдуть одночасно. Поки ті центри, які з'явилися перші, ростуть, з'являються нові і т. д. аж до повної кристалізації цієї маси кристалізуються речовини.

Яка ж природа виникнення центрів кристалізації? Згідно сучасними поглядам структура рідини характеризується тим, що в ній існують асоціації (угруповання) частинок (у випадку розплавлення металу, атомів), які характеризуються упорядкованим розташуванням. Інакше кажучи, структура рідини при відсутності порядку у цілому (дальнього порядку), характеризується наявністю так званого ближнього порядку у розташуванні частинок (атомів). Внаслідок теплового руху атомів ближній порядок нестійкий. Мікрооб'єми з правильним розташуванням атомів, що виникли, можуть існувати деякий час, потім розпадатися, потім виникати знову у іншому елементарному об'ємі рідини і т. д. Зі зниженням температури кількість таких мікрооб'ємів і ступінь ближнього порядку в них зростає.

При температурі, близькій до T_k , у рідкому металі можливе утворення невеликих угруповань, в яких атоми упорядковані уже так, як і в кристалах. Такі угруповання називаються фазовими флуктуаціями. В чистій від сумішей рідині найбільш великі фазові флуктуації можуть перетворюватися у зародки (центри) кристалізації. Число фазових флуктуацій, які переходять у центри кристалізації, зростає по мірі переохолодження рідини. Чим більша ступінь переохолодження ΔT , тим менше мінімальний розмір зародка, здібного до зростання (критичний розмір зародка), тим більше утворюється стійких центрів кристалізації.

Зростання зародка здійснюється у результаті наближення (переходу) до нього атомів із переохолодженої рідини. Кристал зростає на базі зародка пошарово, при цьому кожний шар має одноатомну товщину. Так як ділянок рідини, в яких можуть зароджуватися центри кристалізації дуже багато, то в результаті їх одночасного зростання утворюються полікристалічні тіла. Для одержання монокристала необхідно застосовувати спеціальні методи його вирощування.

Розмір зростаючих кристалітів залежить від числа зародків (n), що виникають за одиницю часу, і швидкості їх росту (ψ). Співвідношення між залежностями цих показників від ступеня переохолодження ΔT . Із рисунка, з обліком вище розглянутого, випливає, що при великих ΔT буде утворюватися дрібнозерниста структура (розміри кристалітів малі), а при малих – крупнозерниста. Аналітично величина зерна в залежності від n і ψ визначається наступним співвідношенням: $S=1,1(\psi/n)^{3/4}$.

Додатком спеціальних домішок досягається більш дрібнозерниста структура металу, що кристалізується. Цей процес називається модифікуванням, а введені речовини – модифікаторами. Так, наприклад, введенням модифікаторів у магнієві сплави досягається зменшення зерен від $0,2 \div 0,3$ мм до $0,01 \div 0,02$ мм, що значно поліпшує механічні властивості сплавів.

Специфічна є і форма зерен. Досвід показав, що вона залежить від реальних умов кристалізації – швидкості і напрямлення відводу тепла, наявності нерозчинності частки і т. д. Швидкість росту кристалів більше у напрямленні відводу тепла, тому кристал росте нерівномірно по деревоподібній (дендритній) формі: спочатку виростають вітки – осі першого порядку, потім другого, третього і т. д. порядків. Після цього кристалізується метал між осями дендритів. Утворені при цьому з'єднані кристали з неправильною зовнішньою обмеженістю називається зернами або кристалітами. Слід зауважити, що розмір кристалів (зерен) сильно впливає на його механічні властивості. Ці властивості, і, особливо, в'язкість і пластичність, тим вище, чим більш дрібне зерно має метал.

Додамо на закінчення, що розглядалий вище процес кристалізації, по так званому дифузійному (нормальному) механізму, називається спонтанним. Він вимагає дуже великих ступенів переохолодження, особливо для чистих металів і реалізується надто рідко. В реальних умовах утворення центрів кристалізації відмічається присутністю у розплаві твердих частинок різних домішок неметалевих включень, стінок форми і т. д. Все це служить підставою для полегшення утворення зерен.

Механізм процесу кристалізації

Ще в 1878 р. Д. К. Чернов, вивчаючи структуру литої сталі, вказав, що процес кристалізації складається із двох елементарних процесів. Перший процес полягає у зародженні найдрібніших частин кристалів, які Чернов називав «зачатками», а тепер їх називають зародками, або центрами кристалізації. Другий процес полягає в зростанні кристалів з цих центрів.

Систематичне дослідження процесу утворення центрів кристалізації і їх зростання спочатку на прозорих органічних речовинах, а потім і металах було проведено Г. Тамманом. Їм встановлена в загальному вигляді залежність між числом центрів кристалізації, швидкістю росту і ступенем переохолодження. Однак бо леї пізні дослідження процесів кристалізації, особливо дослідження А. А. Бочвара, К. П. Буніна та ін, показали обмежене значення схеми Таммана для процесу кристалізації реальних рідких металів, оскільки вони містять нерозчинені (зважені) частки, службовці центрами кристалізації.

Все ж багато закономірностей, встановлені Тамманом на основі його досвіду, знайшли якісне підтвердження в наступних роботах і виявляються корисними при аналізі процесів кристалізації.

Процес утворення кристалів шляхом зародження центрів кристалізації і їх зростання можна вивчати за допомогою розгляду моді лей (схем), що з успіхом застосовувалося І. Л. Міркіних. Подібна модель кристалізації представлена на рис.4. Припустимо, що на площі, що на рис. 4 за секунду виникає п'ять зародишів, які ростуть з певною швидкістю.

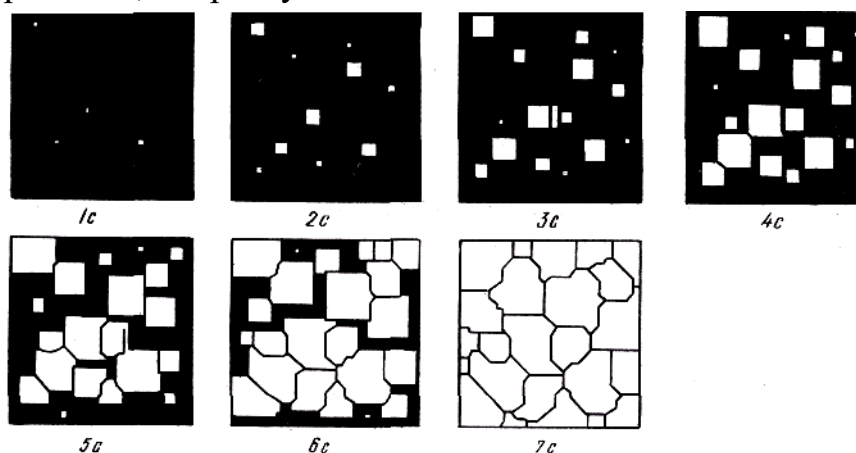


Рис. 4. Модель процесу кристалізації

К- кінця першої секунди утворилося п'ять зародків, до кінця другого секунди вони вирости і одночасно з цим виникло ще п'ять нових зародишей майбутніх кристалів. Так, в результаті виникнення зародишей і їх зростання відбувається процес кристалізації, який, як видно в даному прикладі, закінчується на сьомій секунді. Якісна схема процесу кристалізації, зображена на рис. 4, може бути представлена кількісно кінетичної кривої (рис. 5).

Розгляд подібних схем кристалізації дозволяє пояснити нитка два важливих моменти:

1. У міру розвитку процесу кристалізації в ньому бере участь все більше і більше число кристалів. Тому процес спочатку прискорюється, поки в якийсь момент взаємне зіткнення зростаючих кристалів не починає помітно перешкоджати їх росту; зростання кристалів сповільнюється, тим більше, що і рідини, в якій утворюються нові кристали, стає все менше. Зазвичай, коли закристалізувалося 50 % рідини.

2. У процесі кристалізації, поки кристал оточений рідиною, він часто має правильну форму, але при зіткненні і зрощенні кристалів їх правильна форма

порушується, зовнішня, форма кристала виявляється залежною від умов зіткнення ростучих кристалів. Ось чому кристали металу, зерна (кристаліти) не мають правильної форми.

Швидкість всього процесу кристалізації кількісно визначається двома величинами: швидкістю зародження центрів кристалізації і швидкістю росту кристалів (рис. 6.). Обидві ці величини можна виміряти для різних умов кристалізації.

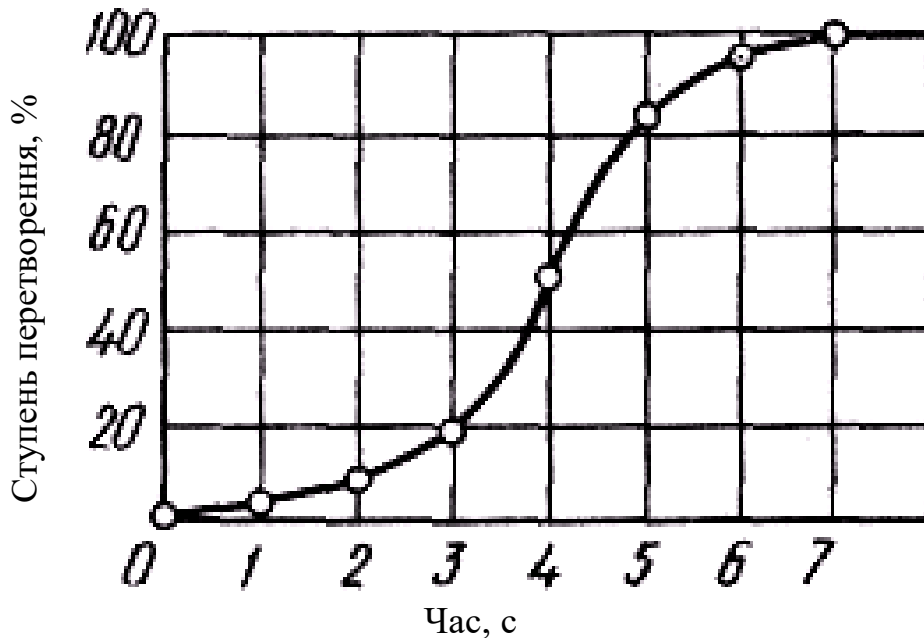


Рис. 5. Кінетична крива кристалізації

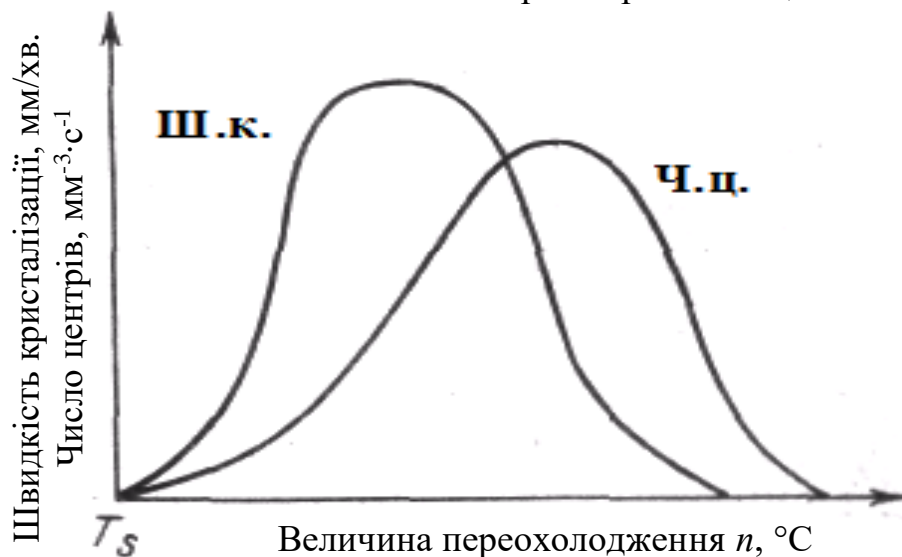


Рис. 6. Швидкість росту кристалів (ш. к.) і швидкість зародження центрів кристалізації (ч. ц.) Залежно від ступеня переохолодження

Число зароджуються в одиницю часу кристалів, які надалі ми будемо позначати буквами ч. ц., має розмірність $1/\text{мм}^3\text{с}$ (число центрів кристалізації, що виникли в 1 мм^3 за одну секунду). Швидкість росту кристалів, що позначається надалі через ш. к., є швидкість збільшення лінійних розмірів кристала, виражена в міліметрах в одиницю часу. Розмірність цієї величини -

мм / с; мм / хв.

Досліджуючи кристалізацію прозорих органічних речовин при різних температурах, Г. Тамман встановив, що ч. ц. та ш. к. визначаються ступенем переохолодження. Графічно зміни величин ч. ц. та ш. к. залежно від переохолодження представлені на рис. 6. Залежність ч. ц. та ш. к. від переохолодження виражається кривою з максимумом. При теоретичній температурі кристалізації ($n=0$) значення ш. к. і ч. ц. дорівнюють нулю і процес кристалізації йти не може, що знаходиться в повній відповідності з викладеним вище положенням про необхідність переохолодження для протікання процесу. Із збільшенням переохолодження значення ш. к. і ч. ц. зростають, досягають максимуму і потім знижуються; при великих величинах переохолодження практично падають до нуля.

Збільшення ш. к. і ч. ц. при малих ступенях переохолодження обумовлено тим, що поблизу рівноважної точки (ТЗ) рухливість атомів велика і прискорення кристалізації із збільшенням ступеня переохолодження викликається збільшенням різниці вільних енергій рідкого і кристалічного станів. Зниження ш. к. і ч. ц. при великих ступенях переохолодження викликано тим, що при великих переохолодженнях і, отже, при низьких температурах рухливість атомів зменшена, а тим самим зменшена і здатність системи до перетворення. При більших ступенях переохолодження ш. к. і ч. ц. стають рівними нулю, так як рухливість атомів вже недостатня для того, щоб здійснилася перестройка їх з хаотичного розташування в рідині в правильне в кристалі.

Розмір утворилися кристалів залежить від співвідношення величин ш. к. і ч. ц. при температурі кристалізації, при даній ступеня переохолодження. При великому значенні ш. к. і малому значенні ч. ц. (наприклад, при малих ступенях переохолодження, рис. 6), утворюються нечисленні великі кристали; при малих значеннях ш. к. і великих ч. ц. (велике переохолодження) утворюється велика кількість дрібних кристалів. Нарешті, відповідно до кривими Таммана, якщо вдається дуже сильно переохолодити рідина без кристалізації, то ш. к. і ч. ц. стають рівними нулю, рідина зберігається не перетворена, не закристалізована. Солі, силікати, органічні речовини вельми схильні до переохолодження. Для металів ж потрібно переохолодити рідину до температури, коли рухливість атомів стане мала і такий стан виявиться доніми стійким.

Звичайне прозоре «тверде» скло являє собою переохоложену загуслу рідину. Такий стан є аморфним і характеризується відсутністю певної температури плавлення і відсутністю правильного розташування атомів у вигляді певної кристалічної решітки.

Було показано, що не тільки в рідких розплавах, але і при переобертанні в твердому стані нова форма також утворюється шляхом зародження і росту кристалів; швидкість цих процесів залежить від переохолодження. На відміну від кристалізації з рідини процес перетворення у твердому стані (перекристалізація) зазвичай протікає при сильному переохолодженні, і Таммановська залежність ш. к. і ч. ц. для цього випадку навіть більш прийнятна,

ніж для випадку первинної кристалізації з рідкого стану.

Враховуючи викладене, можна відзначити, що перехід з одного стану в інше, наприклад з рідкого у твердий, можливий тоді, коли твердий стан більш стійко, має більш низьке значення вільної енергії. Але сам перехід з одного стану в інший вимагає витрати енергії на утворення поверхні розділу рідина - кристал. Перетворення станеться тоді, коли вигащ в енергії від пере ходу в більш стійкий стан буде більше втрати енергії, що йде на освіту поверхні розділу. Іншими словами, вільна енергія системи $\Delta\Phi$ визначається як алгебраїчна сума двох членів, що характеризують поверхність $S\sigma$ об'ємну $V\Delta F$ енергії;

$\Delta\Phi = S\sigma - V\Delta F$, де S - поверхня ; σ - поверхневий натяг ; V - об'єм; ΔF - різниця вільних енергій рідкого і кристалічного станів, що припадає на одиницю об'єму.

У міру збільшення зародка (для зародка сферичної форми) поверхневий член збільшується пропорційно квадрату радіусу, а об'ємний - кубу, тобто якщо поверхня і об'єм частинки виразити через її радіус, то отримаємо

$\Delta\Phi = 4\pi r^2\sigma - 3 / 4 \pi r^3\Delta F$, де r - радіус частинки нової фази ; π - число частинок.

Збільшення розміру зароджується кристала спочатку при водить до зростання вільної енергії (так як обсяг применшуючи, а поверхня S відносно велика) (рис. 7). Але при деякому критичному значенні збільшення розміру зародка призведе до зменшення $\Delta\Phi$. Процес кристалізації може протікати тільки за умови зменшення вільної енергії, тому, якщо утвориться зародок розміром менше r_k (див. рис. 7), він рости не може, так як це повело б до збільшення енергії системи. Якщо ж утворюється за родиш розміром r_k і більше, то його зростання можливе, так як це призведе (зменшенню вільної енергії. Мінімальний розмір здатного до зростання зародка називається критичним розміром зародка, а такий зародок називається стійким.

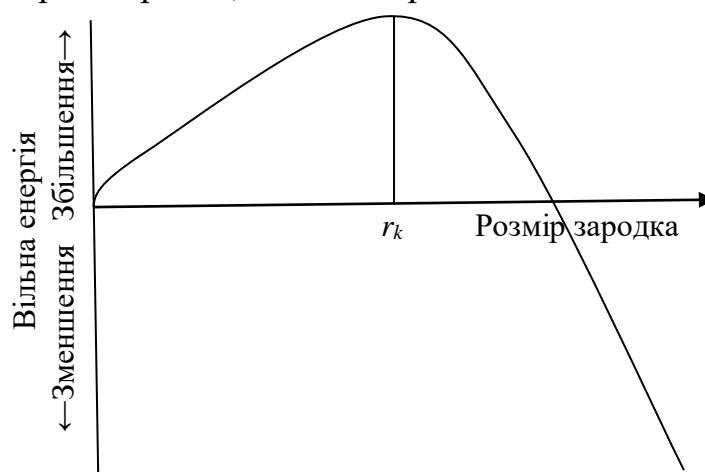


Рис. 7. Зміна вільної енергії залежно від розміру зародка

Кожній температурі кристалізації (ступеня переохолодження) відповідає певний розмір стійкого зародка; дрібніші виникнуть, тут же розчиняються в рідині, а більші ростуть, перетворюючись на зерна - кристали. Чим нижче

температура (більше ступінь переохолодження), тим менший розмір має стійкий зародок, тим більше число центрів кристалізації утворюється в одиницю часу, тим швидше протікає процес кристалізації. Таким чином, зі збільшенням ступеня переохолодження швидко зростають величина ч. ц. і загальна швидкість кристалізації.

Кристалічна будова металів.

Усі речовини можуть перебувати в трьох агрегатних станах (не враховуючи плазмового): твердому, рідкому і газоподібному, переходи між якими (так звані фазові переходи) супроводжуються стрибкоподібними змінами вільної енергії F ($F=U-TS$, де U , - внутрішня енергія; T -температура, S - ентропія), ентропії, густини та інших фізичних властивостей. Четвертим агрегатним станом часто називають плазму - сильно іонізований газ (тобто газ заряджених частинок - іонів, електронів), що утворюється при високих температурах (понад 10^5 К). Але це твердження неточне, оскільки між плазмою і газом немає фазового переходу. Тим не менш, плазма різко відрізняється від газу перш за все сильною електричною взаємодією іонів та електронів, що проявляються на великих відстанях.

Реалізація того чи іншого агрегатного стану речовини залежить головним чином від температури і тиску, при яких воно знаходиться (мал. 8). Важливою характеристикою є відношення середньої потенційної енергії взаємодії атомів E_p до їх середньої кінетичної енергії E_k . Для газів $E_p/E_k \ll 1$, для рідин $E_p/E_k \approx 1$, для твердих тіл $E_p/E_k \gg 1$.

У газах міжмолекулярні (атоми в газах об'єднані в молекули - O_2 , N_2 і т.д.) відстані великі, молекули практично не взаємодіють один з одним і, вільно рухаючись, заповнюють весь можливий обсяг. Таким чином, для газу характерно відсутність власного обсягу і форми.

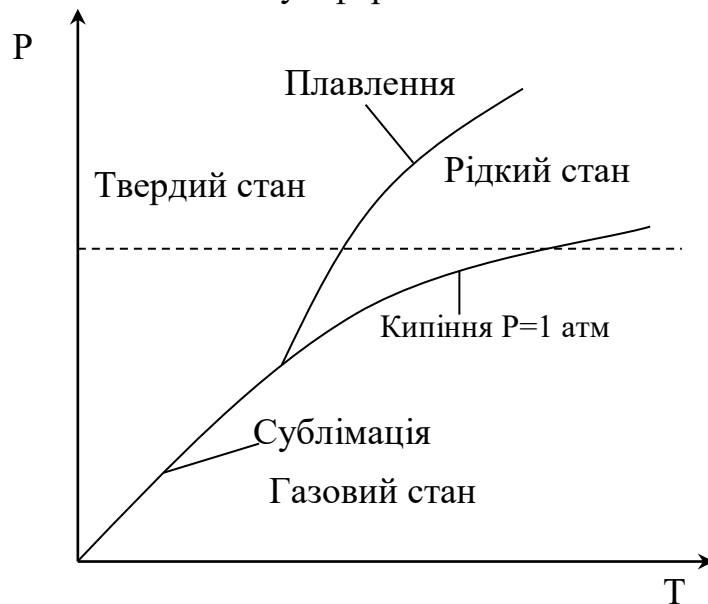


Рис. 8. Діаграма стану речовини залежно від тиску і температури
Рідини і тверді тіла відносять до конденсованого стану речовини. На відміну від газоподібного стану у речовин в конденсованому стані атоми

розташовані ближче один до одного, що призводить до їх більш сильної взаємодії і, як наслідок цього, рідини і тверді тіла мають постійний власний об'єм. Для теплового руху атомів в рідині характерні малі коливання атомів навколо рівноважних положень і часті перескоки з одного рівноважного положення в інше. Це призводить до наявності в рідині тільки так званого ближнього порядку в розташуванні атомів, тобто деякої закономірності в розташуванні сусідніх атомів на відстанях, у порівнянні з міжатомними. Для рідини на відміну від твердого тіла характерна така властивість, як текучість.

Атоми в твердому тілі, для якого на відміну від рідкого тіла характерна стабільна, постійна власна форма, здійснюють тільки малі коливання біля своїх рівноважних положень. Це призводить до правильного чергування атомів на рівних відстанях для як завгодно далеко віддалених атомів, тобто існування так званого далекого порядку в розташуванні атомів. Таке правильне, регулярне розташування атомів в твердому тілі, характеризується періодичної повторюваністю у трьох вимірах (рис. 9), утворює кристалічну решітку, а тіла, що мають кристалічні ґрати, називають твердими тілами. *Тобто*, кристалічна будова характеризується геометрично правильним розташуванням атомів (іонів) у просторі. Атоми металу перебувають на певній відстані між собою, при якій енергія взаємодії позитивних і негативних заряджених частинок мінімальна. В площині атоми утворюють *атомну сітку*, а в просторі - *атомно-кристалічну ґратку*. Атоми коливаються навколо точки рівноваги з великою частотою.

Крім того, існують *аморфні* (від грецького «*аморфос*» - безформний) тіла (скло, віск і т. д.). В аморфних тілах атоми здійснюють малі коливання навколо хаотично розташованих рівноважних положень, тобто не утворюють кристалічну ґратку. Аморфне тіло перебуває з термодинамічної точки зору в нестійкому (так званому метастабільному) стані і слід розглядати як сильно загусла рідина, яка з часом повинна закристалізуватися, тобто атоми в твердому тілі повинні утворити кристалічні ґрати і перетворитися в істинно тверде тіло.

Для аморфного тіла характерна ізотропія властивостей (однакові властивості за різними напрямками), а також відсутність точки плавлення, тобто при підвищенні температури аморфне тіло розм'якшується. Ці особливості викликані відсутністю у аморфного тіла далекого порядку в розташуванні атомів, проте ближній порядок є. Таким чином, аморфне тіло правильніше розглядати як рідина в переохолодженому, метастабільному стані з дуже високим коефіцієнтом в'язкості.

Аморфний стан утворюється при швидкому (10^6 °C/c і більше) охолодження сплаву. Наприклад, при охолодженні ряду сплавів із рідкого стану утворюються так звані металеві скла, які володіють специфічними фізико-механічними властивостями. Які сили утримують атоми у твердому тілі. Між атомами, що утворюють кристалічну тверде тіло, існують сили при тяжіння, які врівноважуються на відстанях порядку $r_0 \approx 10^{-8}$ см силами відштовхування (рис. 10а).

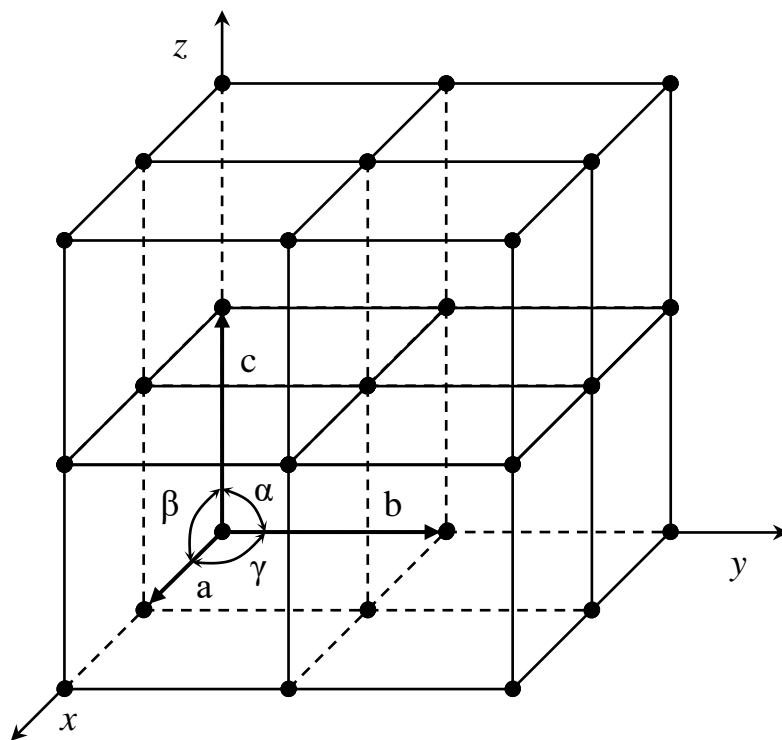


Рис. 9. Кристалічна решітка (виділена елементарна комірка з параметрами a , b , c , α , β , γ)

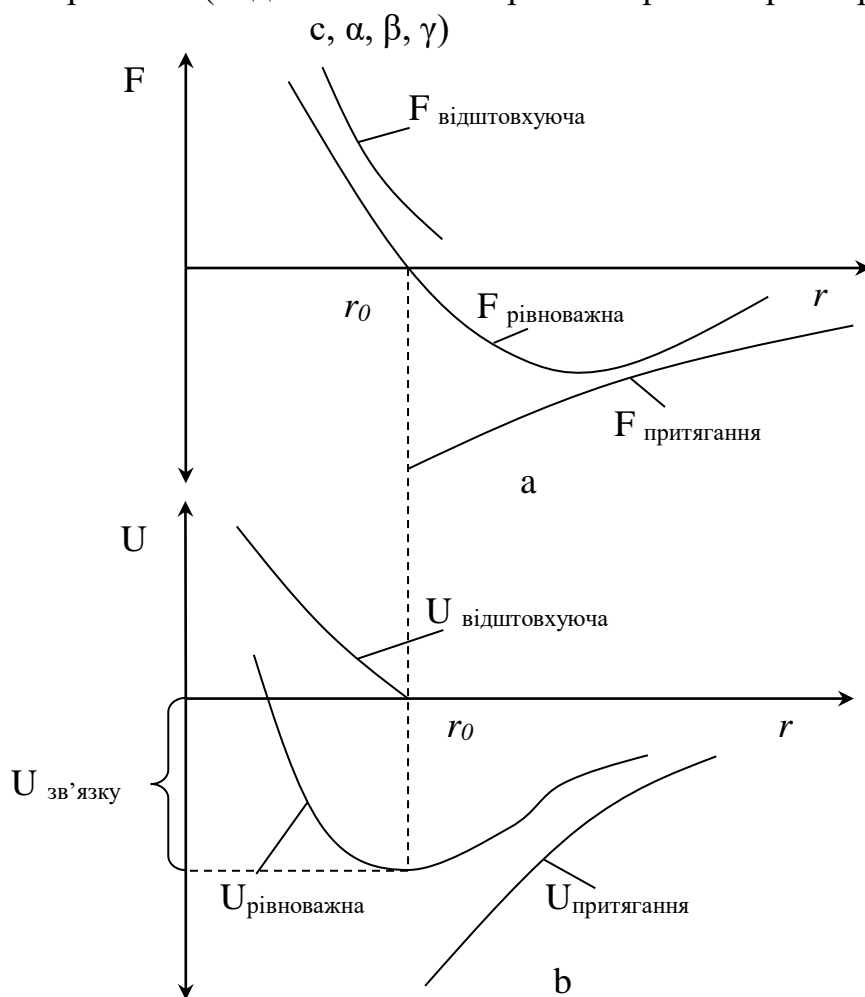


Рис. 10. Схема сил взаємодії (а) і потенційної енергії взаємодії (б) між атомами в залежності від відстані

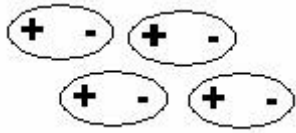
Відповідно при $r_0 \approx 10^{-8}$ см потенційна енергія взаємодії атомом має мінімальне значення (рис. 10б). Таким чином при $r > r_0$ атоми притягуються, при $r < r_0$ - відштовхуються, при $r = r_0$ знаходяться в стійкому положенні. Існування атомно-кристалічної решітки в твердих тілах з міжатомних відстанню близько 10^{-8} см пояснюється тим, що мінімум потенціальної енергії системи досягається саме тоді, коли атоми регулярно, періодично розташовані в просторі. У самому загальному випадку при даній температурі T розташування атомів в кристалічній решітці, тобто структура кристалів, відповідає не мінімуму потенціальної енергії U (точніше внутрішньої енергії U , але в даному розгляді нехтуємо кінетичною енергією атомів), а мінімуму вільної енергії $F = U - TS$. Ця обставина, тобто наявність ентропійного члена T відповідально, зокрема, за різноманіття зустрічаючих у елементів і їх сполук кристалічних структур.

Природу відштовхування атомів у різних твердих тілах можна вважати однаковою: на великих відстанях основну роль грають кулонівських сили відштовхування позитивних іонів (ядер), а на менших відстанях головну роль грають сили відштовхування, що виникають внаслідок перекриття заповнених електронних оболонок зближених атомів.

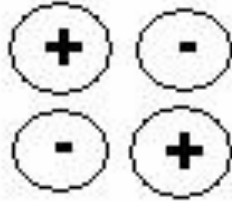
З точки зору хімії, метали це елементи, атоми яких складаються з позитивно зарядженого ядра, навколо якого на різній відстані обертаються негативно заряджені електрони, утворюючи певні електронні оболонки. Зовнішня електронна оболонка металів містить невелику кількість електронів (1-2). Сила притягування ядра атома щодо зовнішніх (валентних) електронів значною мірою компенсується електронами внутрішніх оболонок. Тому атоми металів досить легко втрачають зовнішні електрони і перетворюються на позитивно заряджені іони. Вільні електрони легко переміщуються в усіх напрямках між утвореними позитивно зарядженими іонами, нагадуючи рух частинок газу ("електронний газ").

Тип зв'язку між елементарними частинками в твердому тілі (кристалі) визначається електронною будовою атомів, які взаємодіють. Найважливіші зв'язки: іонний, полярний, ковалентний і металевий. Тип зв'язку істотно впливає на властивості матеріалу.

Сили притягування (сили зв'язку) в твердих тілах істотно відрізняються за своєю природою. Зазвичай розглядають чотири *основні типи зв'язку* в твердих тілах: металеву, іонну, ковалентний і зв'язок Ван-дер-Ваальса. У більшості випадків зв'язку в твердих тілах носять змішаний характер. У металах і сплавах визначальне значення має металевий тип зв'язку. Зв'язок у металах обумовлена взаємодією позитивних іонів з колективізованими електронами. Вільні електрони провідності, перебуваючи між іонами, як би «стягують» їх, компенсуючи сили відштовхуючі. У ряду металів (наприклад, перехідних) певний внесок вносить також ковалентний зв'язок, при якій об'єднуються два атоми, тимчасово передають один одному валентний електрон і утримуючі тому силами електростатичного притягання. При іонного зв'язку сусідні атоми вже постійно обмінялися електронами.

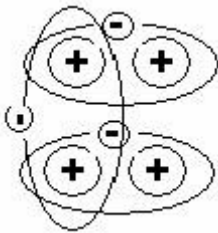


Полярний (молекулярний) зв'язок утворюється за рахунок поляризації (зсуву електронів в атомі в одному напрямку, що викликає появу сил взаємодії між поляризованими атомами (молекулами). Міцність такого зв'язку $0,1\text{eV}$ (електроновольт).



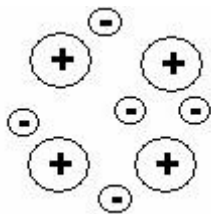
Іонний зв'язок виникає між різнорідними атомами, наприклад натрію і хлору, один з яких віддає свій валентний електрон і перетворюється у позитивно заряджений іон (Na^+), а інший приймає електрон і стає негативно зарядженим іоном (Cl^-). Отже, іонний зв'язок обумовлюється електростатичною взаємодією протилежно заряджених іонів.

Такий зв'язок типовий для неорганічних сполук. У більшості випадків іонні кристали - діелектрики.



Ковалентний зв'язок створюється за рахунок об'єднання валентних електронів сусідніх атомів у одному енергетичному рівні (зовнішній орбіті). Об'єднані електрони належать водночас обом атомам і перебувають на спільній орбіті. Ці електрони мають протилежно скеровані спіни і взаємодіють як два електромагніти. Ковалентний зв'язок утворюють як однорідні атоми (кремній, вуглець в кристалічній ґратці алмазу), так і

різнорідні (залізо - вуглець у хімічній сполуці Fe_3C , алюміній - азот у хімічній сполуці AlN). Ковалентний зв'язок дуже міцний. Багато кристалів з таким зв'язком відзначаються високою температурою плавлення, значною твердістю (карбід, нітриди) і суттєвою зносостійкістю.



Металевий зв'язок реалізується за рахунок електростатичної взаємодії між позитивно зарядженими іонами та негативно зарядженими вільними електронами. Валентні електрони атомів металу порівняно легко втрачають зв'язок зі своїми ядрами, утворюючи так званий електронний газ.

Металевий зв'язок не скерований в одному напрямку. Добра електро- і теплопровідність металів забезпечується вільними електронами.

Існування водночас нейтральних й іонізованих атомів та вільних електронів є основою уявлень щодо особливого типу міжатомного зв'язку, притаманного тільки металам, - металевого. У металі постійно відбувається обмін електронами між нейтральними та іонізованими атомами, завжди є певна кількість електронів, що на даний момент не належать якомусь з атомів. Якщо створити у металі різницю потенціалів, рух електронів набуде певного напрямку і виникне електричний струм. Наявністю вільних (колективізованих) електронів пояснюють існування спільних для всіх металів властивостей (пластичність, непрозорість, блиск, високі електро- і теплопровідність), а їх кількість - різний ступінь «металевості» окремих металів.

Типи кристалічних ґраток, особливості будови реальних металевих матеріалів.

Кристалічні решітки металів.

Як зазначалося атоми в кристалічному твердому тілі розташовуються в просторі закономірно, періодично повторюючись у трьох вимірах через строго певний відрізок, тобто утворюють *кристалічну решітку*.

Кристалічну решітку можна «побудувати», вибравши для цього певний «будівний блок» (аналогічно будівництві стіни з цегли) і багатократного зміщуючи цей блок в трьох непаралельних напрямках. Така «будівельна» одиниця кристалічної решітки має форму паралелепіпеда і називається *елементарною коміркою*.

Всі елементарні комірки, складові кристалічної решітки, мають однакову форму і обсяги. Атоми можуть розташовуватися як в вершинах елементарної комірки, так і в інших її точках (у вузлах кристалічної ґратки). У першому випадку елементарні комірки називаються простими (примітивними), у другому - складними. Якщо форма елементарної комірки визначена і відомо розташування всіх атомів всередині неї, то є повне геометричне опис кристала, тобто відома його атомно-кристалічна структура.

У кристалографії розглядають 14 видів елементарних комірок. Їх називають просторовими решітками Браве.

Для характеристики елементарної комірки задають шість величин: три ребра комірки a , b , c і три кути між ними α , β , γ (мал. 11). Ці величини називаються параметрами елементарної комірки (кристалічної решітки). Усі 14 решіток Браве розподілені по семи кристалічним системам (сингонії) відповідно до орієнтацією і відносними величинами параметрів решітки (рис. 12). Кожна кристалічна система включає одну або декілька типів просторових кристалічних комірок (рис.13).

Всі кристалічні комірки поділені на 4 типа:

проті решітки - де атоми розташовуються тільки по вершинах решітки;

об'ємноцентровані - ще один атом в центрі комірки;

гранецентровані - ще по одному атому в центрі кожної грані;

базоцентровані - ще по одному атому в центрах пари паралельних граней верхньої і нижньої основи.

Вузли (розташування атомів), напрямлення в площині і просторі позначення за допомогою так званих індексів Міллера. Положення будь-якого вузла кристалічної решітки щодо довільно обраного початку координат визначають завданням координат x , y , z . Для однієї елементарної комірки очевидно ці координати рівні параметрами решітки a , b , c відповідно.

Отже весь простір кристала можна розбити на елементарні комірки, а повторюючи в просторі елементарну комірку, можна описати весь кристал. Властивості металів визначаються певним типом кристалічної ґратки. Переважна більшість металів має об'ємноцентровану кубічну, гранецентровану кубічну або гексагональну щільноукладену ґратку.

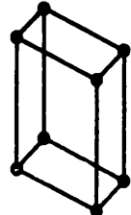
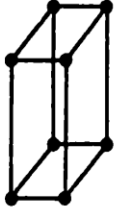
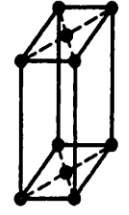
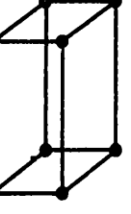
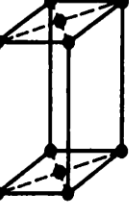
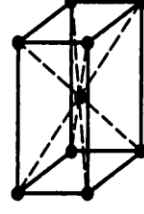


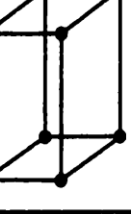


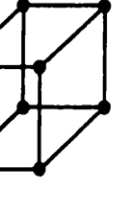
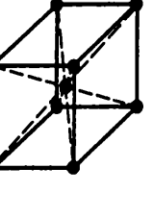

Системи та приклади	Тип решітки			
	Примітивна	Базоцентрована	Об'ємноцентрована	Гранецентрована
<p>Триклічна</p> $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ K_2CrO_7				
<p>Моноклічна</p> $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ S_β				
<p>Ромбічна</p> $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $S_\alpha; Fe_3C$				
<p>Тригональна</p> $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ As, Bi				
<p>Тетрагональна</p> $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Sn_β, TiO_2				
<p>Гексогональна</p> $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ Zn, Cd				
<p>Кубічна</p> $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $Cu, Fe, NaCl$				

Рис. 11. Решітки Браве.

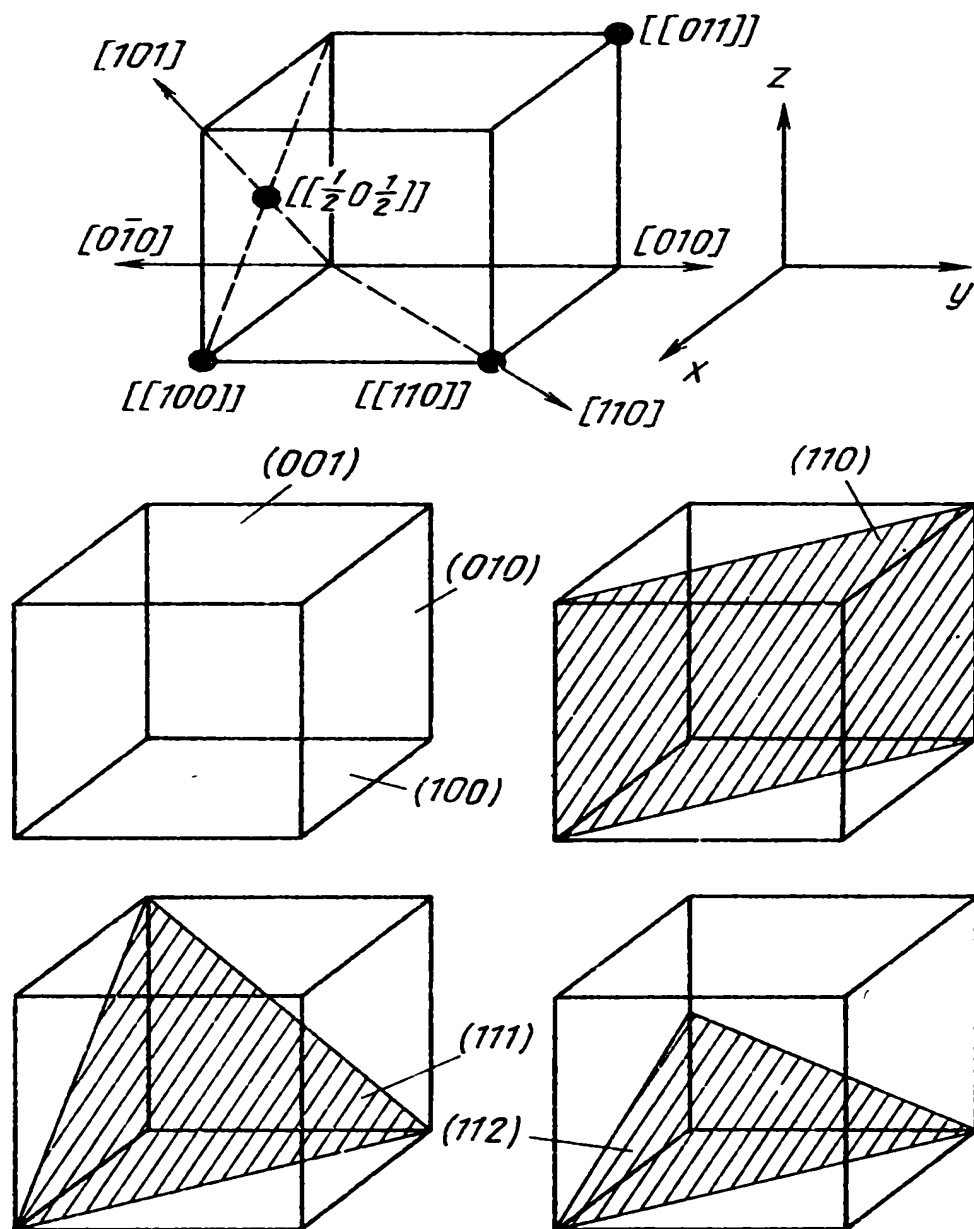


Рис 12. Символи напрямки та площини кубічної комірки.

В кристалічній ґратці де комірка є **об'ємноцентрований куб** (ОЦК) вісім атомів розташовано на перетині ребер куба і один - на перетині його діагоналей. Таку будову (ОЦК) мають метали: калій (К), натрій (Na), β -титан (Ti_{β}), β -цирконій (Zr_{β}), тантал (Ta), вольфрам (W), ванадій (v), α -залізо (Fe_{α}), хром (Cr) та інші.

Елементарна кристалічна ґратка **гранецентрований куб** (ГЦК) має вісім атомів на перетині ребер і шість атомів - на перетині діагоналей граней куба. Така будова властива для свинцю (Pb), нікелю (Ni), срібла (Ag), золота (Au), платини (Pt), γ -заліза (Fe_{γ}) та інших металів.

У **гексагональній ґратці** (ГГ простої) атоми розташовані в кутах і в центрі основ шестигранної призми, всього 14. Таку решітку має вуглець у вигляді графіту.

У **гексагональній щільноукладеній ґратці** (ГЩУ) атоми розташовані в кутах і в центрі основ шестигранної призми, а три атоми - між її основами,

всього 17. Таку решітку мають магній (Mg), α -титан (Ti_α), кадмій (Cd), реній (Re), осмій (Os), рутеній (Ru), цинк (Zn), берилій (Be) та інші метали.

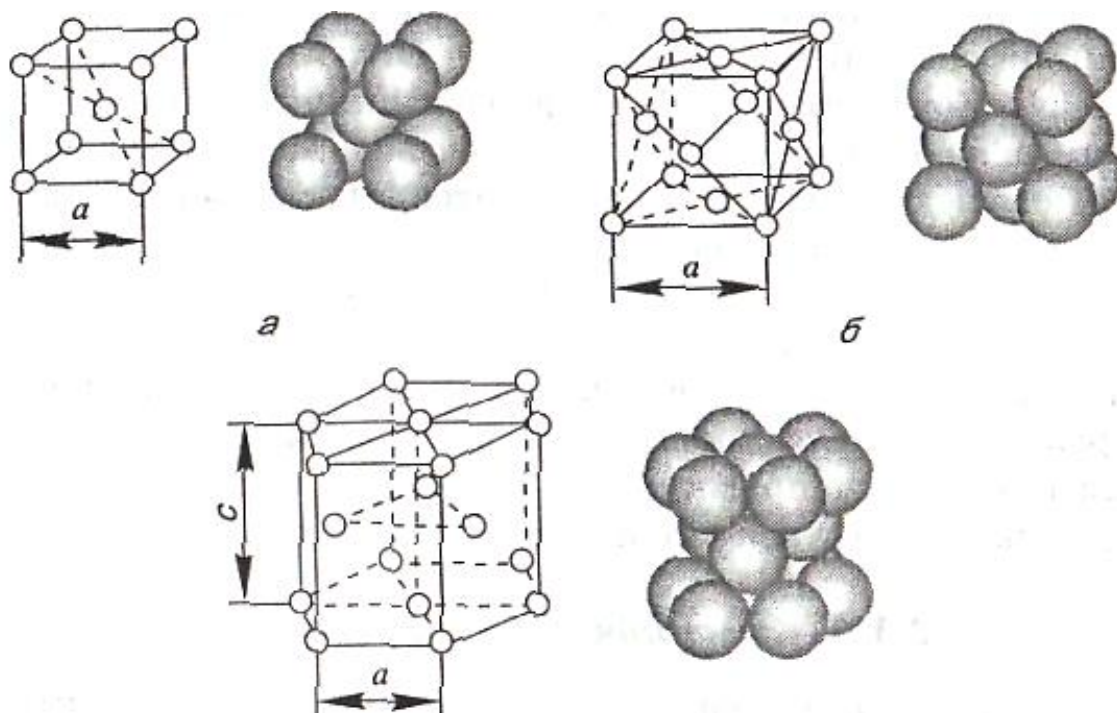


Рис. 13. Елементарні кристалічні комірки:
а – об'ємноцентрований куб; *б* - гранецентрований куб;
в – гексагональна щільноукладен Комірка.

Кристалічна комірка характеризує особливість будови кристала.

Основними параметрами комірки є:

- Кути між осями - α , β і γ .
- Відстані a , b , і c між центрами атомів, які знаходяться в сусідніх вузлах комірки, називають *параметрами* або *періодами решітки*.

Для кубічної комірки це довжина ребра куба a , яка вимірюється в нанометрах (нм) або в ангстремах. Один ангстрем $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$, один нанометр $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10 \text{ \AA}$. Для металів з кубічною елементарною решіткою значення a перебуває в межах $0,2 \dots 0,7 \text{ нм}$, визначається рентгеноструктурним аналізом з точністю п'ять знаків після коми.

- *Базис n* або кількість атомів, які припадають на одну елементарну комірку.

- Якщо прийняти, що атоми в решітці є пружні дотичні кулі, то неважко побачити, що в решітці, крім атомів, є значна вільний простір який характеризується щільністю. Щільність кристалічної решітки, тобто об'єм, зайнятий атомами, характеризується координаційним числом і коефіцієнтом компактності. *Координаційним числом* називається число атомів, які знаходяться на найбільш рівно близькій відстані від даного атома.

Для ОЦК-решітки координаційне число дорівнює 8, для ґрат ГЦК та ГГ воно становить 12. З цього випливає, що ґрати ОЦК менш компактна, ніж ґрати ГЦК і ГГ. У ґратах ОЦК кожен атом має всього 8 найближчих сусідів, а в ґратах ГЦК і ГГ - 12.

- Коефіцієнт компактності Q дорівнює відношенню сумарного об'єму атомів що входять в елементарну комірку до об'єму комірки:

$$Q = (4 \cdot 100 \pi R^3 n) / (3V),$$

де: R - радіус атома (іона); n - базис або кількість атомів, приходять на одну елементарну комірку; V - об'єм елементарної комірки.

Для простої кубічної решітки $n = (1/8) \cdot 8 = 1$; $V = a^3 = (2R)^3$ і $Q = 52\%$. Для ОЦК $n = (1/8) \cdot 8 + 1 = 2$. Враховуючи, що атоми дотикаються по діагоналі куба, довжина якої дорівнює 4 атомним радіусам, параметр решітки дорівнює $a = 4R$, а $Q_{\text{ОЦК}} = 68\%$. Провівши аналогічні обчислення, знайдемо $Q_{\text{ГЦК}} = 74\%$, $Q_{\text{ГГ}} = 74\%$. Таким чином, грати ГЦК і ГГ більш компактні, ніж ОЦК (табл. 2).

Таблиця 2. Характеристика кристалів.

Параметр	Тип решітки		
	примітивна кубічна	о.ц.к.	г.ц.к.
Об'єм елементарної комірки	a^3	a^3	a^3
Базис	1	2	4
Щільність упаковки (компактність)	0,52	0,68	0,74
Координаційне число	6	8	12
Відстань між ближніми сусідами	a	$\frac{\sqrt{3}}{2} a$	$\frac{a}{\sqrt{2}}$

Загальні відомості про вади будови металів.

Реальні метали складаються з кристалів з певними вадами. Вади бувають:

- точкові: вакансія - це пусті вузли (рис. 14а), дівакансія; розчинення - міжвузлове розташування власного або іншого хімічного елемента атома. (рис. 14б, 3); заміщення - розташування атома іншого хімічного елемента у вузлах кристалічної ґратки (рис. 14ж), кількість цих вад зростає з підвищенням температури;
- лінійні: дислокація (крайові та гвинтові) – це зайвий край кристалографічної площини, які є ніби зсув частини кристалічної решітки (по лінії АВ рис. 14в). Дислокації характеризуються великою протяжністю в одному напрямі;
- поверхневі: наявність субзерен або блоків 1, 2 всередині кристала (рис. 9г), а також різною орієнтацією кристалічних решіток зерен 1, 2 (рис. 14д).

Вади кристалів істотно впливають на всі властивості металів.

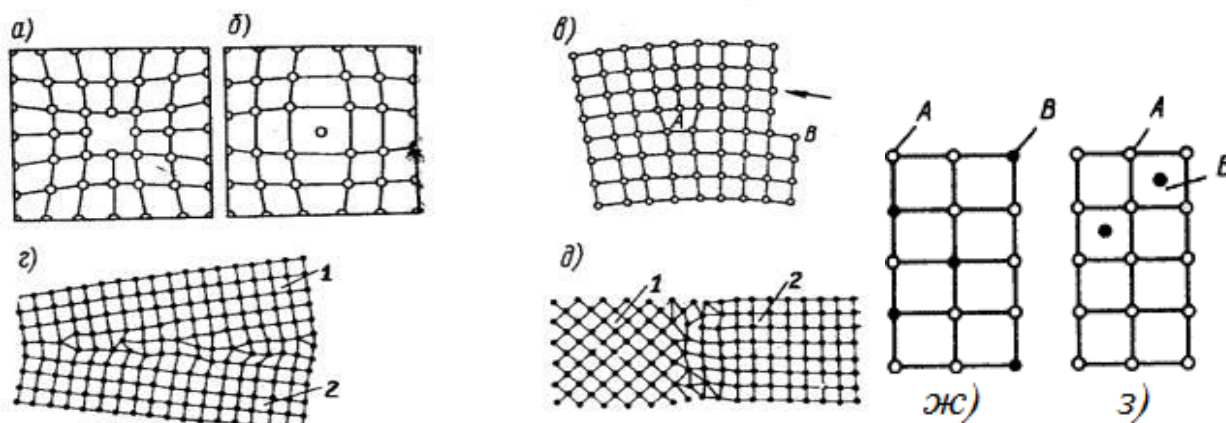


Рис. 14. Вади ґрат.

Алотропія металів. Ізотропія, анізотропія в кристалах і металах. Процеси кристалізації в металах і вплив зовнішніх факторів на їх протікання. Кристалічно-дендритна будова зливка. Поняття про хімічні, фізичні, механічні та технологічні властивості металів.

Алотропія металів (або поліморфізм) - це властивість перебудувати решітку при певних температурах у процесі нагрівання або охолодження. Алотропія властива всім елементам, які змінюють валентність при зміні температури (залізо, марганець, нікель, олово та ін.).

Для прикладу у заліза алотропне перетворення проходить при температурі 911 °С, нижче від якої атоми складають решітку об'ємноцентрованого куба, а вище - решітку гранецентрованого куба.

Структура, що має ту чи іншу решітку, називається алотропною формою або модифікацією. Різні модифікації позначаються грецькими буквами α , β , γ , δ , ε і т.п. Алотропні перетворення супроводжуються віддачею (зменшенням) або поглинанням (збільшенням) енергії.

Поліморфні перетворення.

Поліморфним перетворенням називають зміну кристалічної будови залежно від температури та тиску.

Перехід до нового типу кристалічної ґратки супроводжується зменшенням вільної енергії кристалів, що утворюються, порівняно з вихідними кристалами. Велике практичне значення має **температурний поліморфізм**, тобто наявність у металі різної кристалічної будови в інтервалі певних температур. На кривих охолодження поліморфному перетворенню відповідає горизонтальний відрізок сталої температури, завдяки виділенню прихованої теплоти перекристалізації. Близько 30 металів мають два, а іноді й три різні типи елементарних кристалічних ґраток.

Кристалічну будову, стійку при низьких температурах, позначають грецькою літерою α , при високих температурах — літерою β , при ще вищих — літерою γ і т. д. Перелічені грецькі літери у вигляді індексів долучають до символу хімічного елемента (наприклад, Fe_α , Fe_γ , Ti_α , Ti_β , Sn_α , Sn_β). У рівноважному стані залізо має дві температури поліморфного перетворення: 911 і 1392 °С (рис. 15). Воно кристалізується при температурі 1539°С з утворенням кристалічної ґратки об'ємноцентрованого куба Fe_α . При температурі 1392 °С внаслідок вторинної кристалізації об'ємноцентрована ґратка Fe_α переходить у гранецентровану Fe_γ , а при 911°С — знову в об'ємноцентровану ґратку Fe_α . Критична температура 768 °С не пов'язана з вторинною кристалізацією, а лише зі змінами в міжелектронній взаємодії, внаслідок чого залізо під час охолодження набуває магнітних властивостей. При температурах, вищих за 768 °С, залізо немагнітне.

Зміна типу кристалічної будови у твердому стані відбувається шляхом зародження центрів нових кристалів і подальшого їх росту. Такий процес іноді називають **вторинною кристалізацією** на відміну від кристалізації первинної, що відбувається у рідині. Під час вторинної кристалізації зародки нових кристалів найчастіше виникають на границях зерен старих кристалів.

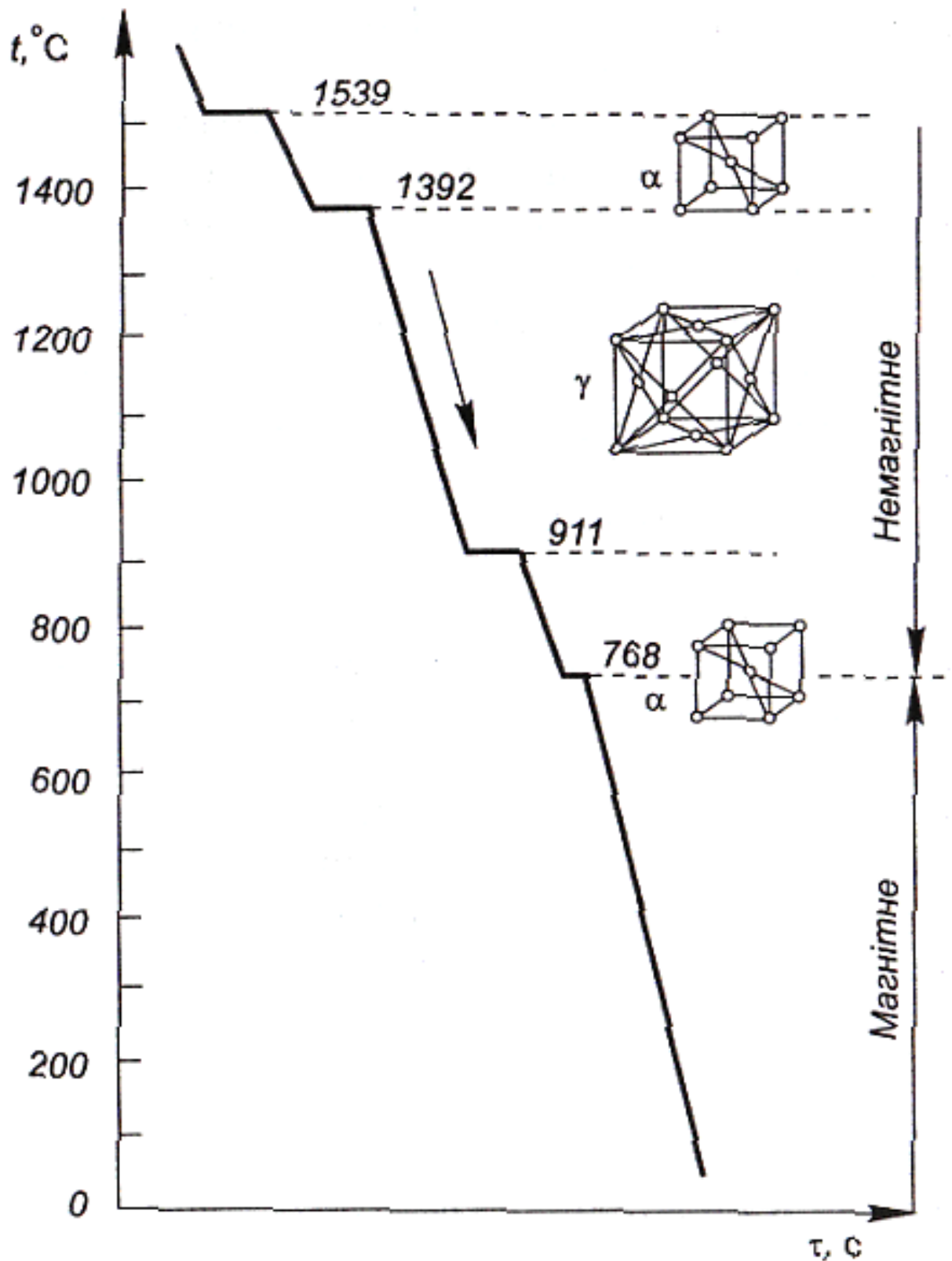


Рис. 15. Поліморфізм у заліза.

Анізотропія (від греч.(грецький) *ánisos* – нерівний і *trópos* – напрям), залежність фізичних властивостей речовини (механічних, теплових, електричних, магнітних, оптичних) від напрямку (в протилежність *ізотропії* – незалежності властивостей від напрямку). Приклади анізотропії: пластинка слюди легко розщеплюється на тонкі листочки лише уздовж певної площини (паралельно цій площині сили зчеплення між частками слюди найменші);

м'ясо легше ріжеться уздовж волокон, бавовняна тканина легко розривається уздовж нитки (у цих напрямках міцність тканини найменша).

Природна анізотропії – найбільш характерна особливість кристалів. Саме тому, що швидкості росту кристалів у різних напрямках різні, кристали зростають у вигляді правильних многогранників: шестикутні призми *кварцу*, кубики кам'яної солі, восьмикутні кристали *алмазу*, всілякі, але завжди шестикутні зірочки сніжинок. Анізотропни, проте, не всі властивості кристалів. Щільність і питома теплоємність у всіх кристалів не залежать від напрямку. Анізотропія останніх фізичних властивостей кристалів тісно пов'язана з їх симетрією і виявляється тим сильніше, чим нижче *симетрія кристалів*.

При нагріванні кулі з ізотропної речовини він розширюється на всі боки рівномірно, тобто залишається кулею. Кристалічна куля при нагріванні змінить свою форму, наприклад перетвориться на еліпсоїд. Може статися, що при нагріванні куля розширюватиметься в одному напрямі і стискуватиметься в іншому (поперечному до першого). Температурні коефіцієнти лінійного розширення уздовж головної осі симетрії кристала ($\alpha_{//}$) і перпендикулярно цій осі (α_{\perp}) різні по величині і знаку (табл. 3).

Таблиця 3. Температурні коефіцієнти лінійного розширення деяких кристалів уздовж головної осі симетрії кристала і в перпендикулярному їй напрямі

	$\alpha_{//} \cdot 10^6, \text{град}^{-4}$	$\alpha_{\perp} \cdot 10^6, \text{град}^{-4}$
Олово	30,5	15,5
Кварц	13,7	7,5
Графіть	28,2	—1,5
Теллур	—1,6	27,2

Аналогічно розрізняються питомі електричні опори кристалів уздовж головної осі симетрії $r_{//}$ і перпендикулярно їй r_{\perp} (табл. 4).

Таблиця 4. Питомий електричний опір деяких кристалів уздовж головної осі симетрії і перпендикулярно їй ($1 \text{ ом} \cdot \text{см} = 0,01 \text{ ом} \cdot \text{м}$)

	$r_{//} \cdot 10^6, \text{ом} \cdot \text{см}$	$r_{\perp} \text{ ом} \cdot \text{см}$
Магній	3,37	4,54
Цинк	5,83	5,39
Кадмій	7,65	6,26
Олово (біле)	13,13	9,05

При поширенні світла в прозорих кристалах (окрім кристалів з кубічними ґратами) світло випробовує *подвійне променезаломлення* і поляризується порізно у різних напрямках (оптична). У кристалах з гексагональною, тригональною і тетрагоном ґратами (наприклад, в кристалах *кварцу*, *рубіна* і *кальциту*) подвійне променезаломлення максимальне в напрямі, перпендикулярному до головної осі симетрії, і відсутній уздовж цієї осі. Швидкість поширення світла в кристалі v або показник заломлення кристала n різні в різних напрямках. Наприклад, в кальциту показники заломлення

видимого світла уздовж осі симетрії $n_{//}$ і перпендикулярно їй n_{\perp} рівні: $n_{//} = 1,64$ і $n_{\perp} = 1,58$; в кварцу: $n_{//} = 1,53$, $n_{\perp} = 1,54$.

Механічна анізотропія полягає у відмінності механічних властивостей - міцності, твердості, в'язкості, пружності - у різних напрямках. Кількісно пружну анізотропію оцінюють по максимальній відмінності модулів пружності. Так, для полікристалічних металів з кубічними ґратами відношення модулів пружності уздовж ребра і уздовж діагоналі куба для заліза рівне 2,5, для свинцю 3,85, для бету-латуні 8,7. Кубічні монокристали характеризуються трьома головними значеннями модулів пружності (таблиця. 5).

Таблиця 5. Головні значення модулів пружності деяких кубічних кристалів

Алмаз	95	39	49
Алюміній	10,8	6,2	2,8
Залізо	24,2	14,6	11,2

Для кристалів складнішої структури (нижчій симетрії) повний опис пружних властивостей вимагає знання ще більшого числа значень (компонент) модулів пружності по різних напрямках, наприклад для цинку або кадмію - 5, а для трігліцинсульфата або винної кислоти - 13 компонент,

Полікристалічні матеріали (метали, сплави), що складаються з безлічі кристалічних зерен (кристалітів), орієнтованих довільно, в цілому ізотропні або майже ізотропні. Анізотропія властивостей полікристалічного матеріалу виявляється, якщо в результаті обробки (відпалу, плющення і т. п.) в нім створена переважна орієнтація окремих кристалітів в якому-небудь напрямі (текстура). Так, при плющенні листової сталі зерна металу орієнтуються у напрямі плющення, в результаті чого виникає анізотропія (головним чином механічних властивостей), наприклад для прокатаних сталей межа текучості, в'язкість, подовження при розриві, вздовж і поперек напрямі прокату розрізняються на 15-20% (до 65%).

Причиною природної анізотропії є впорядковане розташування часток в кристалах, при якому відстань між сусідніми частками, а отже, і сили зв'язку між ними різні у різних напрямках. А. може бути викликана також асиметрією і певною орієнтацією самих молекул. Цим пояснюється природна анізотропія деяких рідин, особливо рідких кристалів. У останніх спостерігається подвійне променезаломлення світла, хоча більшість інших їх властивостей ізотропно, як в звичайних рідин.

Анізотропія спостерігається також в певних некристалічних речовинах, в яких існує природна або штучна текстура (деревина і т. п.). Наприклад, фанера або пресована деревина унаслідок шаруватості будови можуть володіти п'єзоелектричними властивостями, як кристали. Комбінуючи скляне волокно з пластмасами, удається отримати анізотропний листовий матеріал з міцністю на розрив до 100 кгс/мм^2 . Штучну анізотропію можна також отримати, створюючи задане розподіл механічної напруги в спочатку ізотропному матеріалі. Наприклад, при гарті скла можна отримати в нім анізотропію, яка спричиняє за собою зміцнення скла

ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ.

Основні властивості конструкційних матеріалів

Матеріали характеризуються різними властивостями, які визначають якість матеріалів та область їх застосування. За рядом признаков основні властивості матеріалів поділяють на фізичні, механічні, технологічні та хімічні.

До фізичних властивостей належать: колір, густина, температура плавлення, електропровідність, магнітні властивості, теплопровідність, теплоємність, відносне видовження і зменшення по довжині при дії різних факторів.

До механічних - міцність, твердість, пружність, пластичність, в'язкість, крихкість.

До хімічних – валентність, окислювальність, розчинність, корозійна стійкість, луготривкість, кислотостійкість, жаростійкість.

До технологічних - рідкотекучість, ковкість, зварюваність, оброблюваність різанням, прогартованість.

Всі ці властивості мають важливе значення при виборі металів для виготовлення того чи іншого виробу.

Кожну властивість металу необхідно технічно грамотно сформулювати. Наприклад, міцність - це властивість металу чинити опір руйнуванню і появи залишкових деформацій під дією зовнішніх сил.

Фізичні та хімічні властивості матеріалів

Фізичні властивості матеріалу характеризують його будову або відношення до фізичних процесів навколишнього середовища. Всі конструкційні матеріали густиною, теплопровідністю та теплоємністю. Для металів важливими фізичними характеристиками є температура плавлення та електропровідність. Будівельні матеріали також характеризуються щільністю, гіроскопічністю, морозостійкістю, вогнестійкістю.

Густина матеріалу визначається відношенням маси до об'єму матеріалу в абсолютно щільному матеріалі ρ .

Таблиця 6. Густина та щільність деяких конструкційних матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м ³	Щільність, кг/м ³
Конструкційна сталь	7850 – 7900	7800 – 7850
Граніт	2700 – 2800	2600 – 2700
Пісок	2500 – 2600	1450 – 1700
Керамічна цегла	2600 – 2700	1600 – 1900
Сосна	1500 – 1550	450 – 600
Поропласт	1000 – 1200	20 – 100

Більшість будівельних матеріалів мають порожнисту будову, тому вони характеризуються щільністю або середньою густиною ρ_m . У щільних матеріалів (сталь, скло, бітум та ін.) густина і щільність практично однакові.

Щільність матеріалу залежить від його порожнистості та вологості. Штучні матеріали, наприклад бетон, можна отримувати з різним ступенем порожнистості.

Сипучі матеріали (пісок, цемент, щебінь тощо) характеризуються насипною щільністю.

Основними хімічними властивостями конструкційних матеріалів є хімічна та корозійна стійкість.

Хімічна стійкість – здатність матеріалів протидіяти руйнівній дії лугів, кислот, розчинених у воді солей і газів.

Корозійна стійкість – здатність матеріалів протидіяти корозійному впливу навколишнього середовища. Багато конструкційних матеріалів не мають достатньої корозійної стійкості. Так більшість цементів руйнуються під дією кислот, бітуми не стійкі проти дії розчинів лугів, деревина та вуглецева сталь мають невисоку корозійну стійкість. Найкращу корозійну стійкість мають благородні метали, титан, алюміній та більшість їх сплавів, спеціальні сталі, щільна кераміка та більшість пластмас.

Механічні властивості матеріалів

До механічних властивостей належать міцність, пружність, пластичність, твердість, ударна в'язкість, витривалість, зносостійкість та ін. Від механічних властивостей матеріалу залежить його поведінка при деформації і руйнуванні під дією зовнішніх сил. Для їх визначення зразки металів встановленого розміру і форми піддають випробуванням на спеціальних машинах та приладах у певних умовах. Умови випробувань поділяють на статичні (навантаження на зразок зростають повільно і плавно), динамічні (навантаження зростає з великою швидкістю і має ударний характер) та циклічні (навантаження багаторазово змінюються за величиною і напрямком).

Статичні навантаження при випробуваннях можуть бути розтягувальними та стискувальними. Метали частіше всього випробовують на розтягування, визначаючи межі пружності, плинності і міцності та його пластичність.

Міцність і пластичність металу

Характеристики міцності та пластичності отримують при розтягуванні зразку у вигляді круглого стержня або полоси. На спеціальних машинах записують залежність видовження зразка від навантаження. На основі цих даних будують діаграму залежності відносного видовження зразка δ від напруження σ (мал. 16).

Вид діаграми суттєво залежить від **пластичності** матеріалу, що характеризує здатність, не руйнуючись, змінювати форму під дією навантаження і зберігати її після того, як навантаження перестане діяти.

Відрізок ОА діаграми відповідає пружній деформації металу, коли виконується закон Гука $\sigma = E \cdot \delta$, де E — модуль пружності (модуль Юнга).

Напруження, що відповідає граничній пружній деформації в точці А, називають **межею пропорційності** σ_a (чи **межею пружності**). В системі СІ її виражають у МПа. При вищих напруженнях відбувається рівномірна пластична деформація (видовження та звуження поперечного перетину) зразка. Оскільки

практично неможливо визначити початок переходу металу в непружний стан, межу пружності встановлюють умовно, задаючись залишковою деформацією, частіше 0,001; 0,005; 0,02 і 0,05%. Межу пружності відповідно позначають $\sigma_{0,01}$; $\sigma_{0,05}$ і т.д. Ця характеристика важлива для пружинних та інших матеріалів.

Чимало пластичних матеріалів при напруженнях дещо вищих за σ_a , на діаграмі розтягу мають ділянку, при якій зразок деформується без збільшення навантаження. Напруження, що відповідає цьому стану матеріалу, називають **межею плинності** і позначають σ_T . Напруження, що діють в деталі, повинні бути меншими за межу плинності.

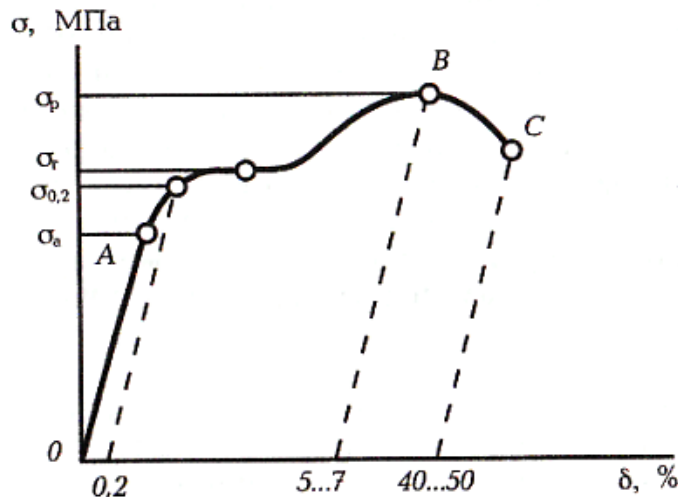


Рис.16. Діаграма розтягу сталі

Подальший розтяг зразка супроводжується рівномірним зростанням напруження до σ_v — **межі міцності** (здатності протидіяти руйнуванню під дією зовнішніх сил). Це напруження є найбільшим і відповідає початку великої пластичної деформації невеликої ділянки зразка, що називається шийкою. Саме тут перетин зразка значно зменшується і відбувається руйнування.

Напівкрихкі матеріали руйнуються при напруженнях, що дорівнюють σ_v , у крихких — ділянка плинності відсутня.

За діаграмою розтягу визначають такі характеристики пластичності як відносне видовження δ та відносне звуження ψ . Відносне видовження характеризує приріст довжини зразка щодо початкової, а відносне звуження — щодо зменшення площі перетину:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

де l_1 і l_0 — довжина зразка до і після деформації;

$$\psi = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \cdot 100\%$$

де S_1 і S_0 — відповідно площі перетину зразка до і після випробувань. За показниками пластичності визначають придатність матеріалу до пластичної деформації під час обробки тиском, а також здатність його перерозподіляти напруження при перевантаженнях. Ці дані важливі як для конструкторів, так і для технологів. Наприклад, пластичні матеріали більш надійні в роботі, бо при їх застосуванні менша ймовірність небезпечного крихкого руйнування.

Міцність неметалевих матеріалів

Матеріали мінерального походження (камінь, цегла, бетон тощо) добре працюють на стискування, тому їх застосовують у відповідних конструкціях. Міцність таких матеріалів визначається стискуванням зразків певних розмірів на пресах. **Межа міцності на стискування** визначається як відношення прикладеної до зразка сили до площі поперечного перерізу зразка. За межею міцності для кам'яних матеріалів встановлюється марка (4, 7, 10, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000). Так матеріали з межею міцності на стискування 20 – 29,9 МПа відносяться до марки 200.

Деревинні матеріали також випробовують на розтягування та стискування, визначаючи відповідну межу міцності в МПа.

Міцність залежить також від структури матеріалу, його щільності, вологості, напрямку дії прикладеної сили.

Конструкційні матеріали випробовують також на міцність при згинанні зразків певних розмірів. На згин випробовують зразки у вигляді балок, розміщених на двох опорах. До середини балок прикладають певну силу, яка поступово зростає до руйнування зразків. За прикладеною силою і розмірами балки визначають **межу міцності на згин**. Ця межа міцності в значній мірі залежить від профілю виробу.

Таблиця 7. Міцність деяких конструкційних матеріалів

Матеріали	Межа міцності, МПа, при		
	стискуванні	згинанні	розтягуванні
Граніт	150 – 250	–	3 – 5
Важкий бетон	10 – 50	2 – 8	1 – 4
Керамічна цегла	7,5 – 30	1,8 – 4,4	–
Конструкційна сталь	210 – 600	–	380 – 900
Деревина (за волокнами)	30 – 65	70 – 120	55 – 150
Склопластик	90 – 150	130 – 250	60 – 120

Твердість

Статичне стискування металу спеціальним індентором застосовують при визначенні **твердості** — здатності металу протидіяти пружним і пластичним деформаціям під час проникнення іншого твердішого тіла. Найчастіше практикуються випробування твердості металів за методами Брінелля, Роквелла та Віккерса (рис. 17).

Визначення твердості за методом Брінелля зводиться до втискання у випробовуваний матеріал сталевий загартований кульки певного діаметра, на яку діє сила F протягом часу, достатнього для закінчення в металі пластичних деформацій. Вимірюється діаметр відбитка і за таблицями визначається величина твердості (**HB**).

По методу Роквелла твердість визначають за глибиною проникнення алмазного конуса чи кульки діаметром 1,6 мм, вираженою в умовних одиницях (**HRC, HRA** чи **HRB**). За методом Роквелла визначають твердість твердих, дуже твердих і м'яких матеріалів. Відповідно використовують алмазний конус з

кутом 120° та сумарне навантаження $1,47 \text{ кН}$ (шкала С), алмазний конус та сумарне навантаження $0,59 \text{ кН}$ (шкала А) та сталеву кульку з навантаженням $0,98 \text{ кН}$ (шкала В). Спочатку до індектора прикладають попередню силу F_0 , під дією якої він заглиблюється в метал на величину h_0 . Потім плавно додають основну силу F_1 . За одиницю твердості прийнята величина, що відповідає осьовому переміщенню індентора на $0,002 \text{ мм}$.

Метод Віккерса використовують при визначенні твердості деталей малої товщини та тонких дуже твердих поверхневих шарів металевих деталей. Навантаження при випробуваннях становить $0,05 \dots 1,20 \text{ кН}$. Метод мікротвердості використовують при визначенні твердості окремих зерен або дуже тонких шарів металу.

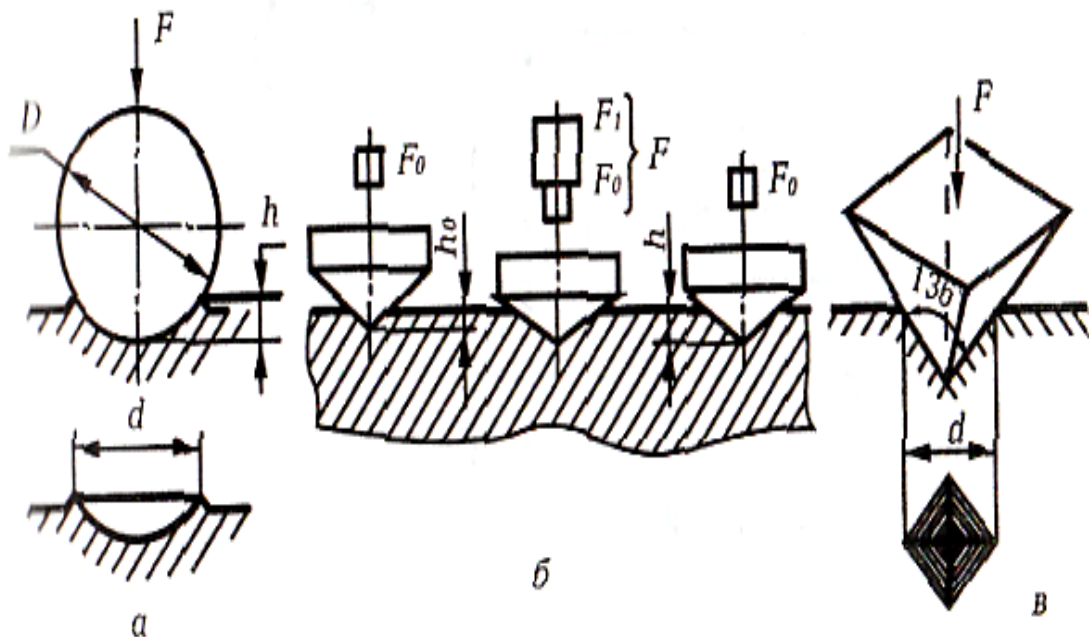


Рис. 17. Схеми визначення твердості металів за методами:
а – Брінелля; б – Роквелла; в – Віккерса.

Твердість деревини, бетону також визначають методом втискування в зразок сталеві кульки. Величину твердості визначають за діаметром чи глибиною відбитка.

Твердість природних кам'яних матеріалів визначають за шкалою твердості (метод Мооса), в якій десять спеціально підібраних матеріалів розміщені в такій послідовності, коли наступний по порядку мінерал залишає слід (царапину) на попередньому.

Ударна в'язкість, витривалість та зносостійкість

Основним видом випробувань металів при динамічних навантаженнях є випробування на ударний згин надрізаних зразків стандартизованого розміру. **Ударною в'язкістю** називають відношення роботи, яка витрачена на руйнування зразка до початкової площі його поперечного перерізу в місці руйнування. Зразок з надрізом встановлюють на маятниковому копрі і наносять удар маятником.

Більшість деталей машин і конструкцій, що працюють при циклічних

навантаженнях, руйнуються після певної кількості циклів при напруженнях, нижчих за σ_T . Це явище називають втомою. За характеристику міцності металу в таких умовах використовують *межу витривалості σ_{-1}* — найбільше напруження, при якому деталь не руйнується після певної кількості циклів навантаження, що називають *базою*. Для сталі вона становить 10^7 циклів, а для кольорових металів - 10^8 . Дослідження проводять на випробувальних машинах, частіше з обертовим зразком.

На *зносоустійкість* конструкційні матеріали випробовують на спеціальних барабанах, що обертаються.

Оскільки при стандартних випробуваннях важко повністю відтворити умови роботи деталі в конструкції чи машині, часто готові деталі додатково випробовують на стендах або в процесі експлуатації. Це хоч і дороге, проте дає змогу приймати обґрунтованіші рішення при виборі матеріалу і способі його зміцнення.

Основні методи дослідження властивостей металів.

На даному етапі для дослідження всіх властивостей металів розроблені відповідні методики та устаткування.

Для дослідження механічних властивостей використовують механічні випробування. Найбільш поширеними є випробування на твердість, статичний розтяг, динамічні випробування, на втомленість, повзучість та зношування, які свідчать про властивості металів.

Статичні - це такі випробування, при яких метал, що випробовують піддають дії постійної сили або сили, яка зростає дуже повільно.

Динамічними називають випробування, при яких метал піддають впливу удару або сили, яка зростає дуже швидко. Статичне випробування на розтяг - поширений спосіб механічних випробувань металів. Для цього випробування виготовляються спеціальні зразки, які розриваються на спеціальних розривних машинах. На розривних машинах одержують діаграму розтягу, по якій можна визначити: межу текучості, межу міцності, відносне видовження і відносне звуження.

Межею текучості називається найменше напруження, при якому без помітного збільшення навантаження продовжується деформація досліджуваного зразка.

Межу текучості визначають за формулою: $G_T = P_T / F_0$,

де P_T - навантаження текучості;

F_0 - поперечний переріз робочої частини зразка до випробування.

Умовне напруження, яке відповідає найбільшому навантаженню, що передуює руйнуванню зразка, називається межею міцності і визначається за формулою:

$G_B = P_B / F_0$,

де R_b - навантаження, що передує розриву зразка.

По відносному видовженні і звуженні оцінюють пластичність металів. Відносне видовження і звуження вимірюють у відсотках (%).

Відносне видовження визначають за формулою:

$$G = (l_1 - l_0) / l_0 \cdot 100(\%),$$

де l_1 - довжина зразка після розриву; l_0 - довжина зразка до розриву.

Відносне звуження визначають за формулою:

$$X = (F_0 - F_1) / F_0 \cdot 100(\%),$$

де F_0 - початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка; F_1 - площа поперечного перерізу після розриву.

Твердість визначають за такими методами: методом Брінелля, методом Роквелла, методом Віккерса.

Метод Брінелля заснований на вдавлюванні твердої кульки у досліджуваний метал. Твердість по Брінеллю розраховується за формулою:

$$HB = P / F$$

де P - навантаження на кульку; F - величина поверхні відбитка.

Принцип вимірювання твердості по Роквеллу заснований на вдавлюванні у досліджуваний метал сталюї кульки $\varnothing = 1,58$ мм або конуса з кутом 120° .

Метод Віккерса дає можливість вимірювати твердість як м'яких так і дуже твердих металів і сплавів. Він придатний для визначення твердості тонких поверхневих шарів. За цим методом у зразок вдавлюють чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині 136° .

Крім цього, для визначення механічних властивостей металів використовують такі випробування:

- випробування на ударний згин;
- випробування на втомленість.

Випробування технологічних властивостей найбільш прості. Вони визначають можливість проводити ті чи інші технологічні операції з даним металом або застосовувати його у тих чи інших умовах. З них найбільш поширеними є випробування: на вдавлювання, на перегин, на іскру, зварюваність, ковкість, рідкотекучість та ін.

Для дослідження мікро- і макроструктури, а також визначення вад внутрішньої будови металів, використовують такі методи: макроаналіз, мікроаналіз, рентгеноструктурний аналіз, магнітна дефектоскопія, застосування радіоактивних ізотопів тощо.

Основні поняття: сплав, компонент, фаза. Тверді розчини. Хімічні з'єднання, механічні суміші. Криві охолодження і діаграми стану. Правило фаз і відрізків.

Поняття про сплави й методи їхнього одержання.

Під сплавом розуміють речовина, отримана сплавкою двох або більше елементів. Можливі інші способи готування сплавів: спікання, електроліз, сублімація. У цьому випадку речовини називаються псевдосплавами. Сплав, приготовлений переважно з металевих елементів, що володіє металевими властивостями, називається металевим сплавом. Сплави мають більше різноманітний комплекс властивостей, які змінюються залежно від сполуки й методу обробки.

Основні поняття в теорії сплавів.

Система – група тіл виділюваних для спостереження й вивчення. У металознавстві системами є метали й металеві сплави. Чистий метал є простою однокомпонентною системою, сплав - складною системою, що складається із двох і більше компонентів.

Компоненти – речовини, що утворюють систему, або чисті хімічні елементи з таблиці Менделєєва. Як компоненти виступають чисті речовини й хімічні сполуки, якщо вони не дисоціюють на складові частини в досліджуваному інтервалі температур.

Фаза – однорідна частина системи, відділена від інших частин системи поверхневого розділу, при переході через яку структура й властивості різко міняються. **Фаза** – однорідна за складом і будовою частка сплаву.

Структура - це комбінація фаз, вона може бути як однофазна так і багатофазна.

Варіантність (C) (число ступенів волі) – це число внутрішніх і зовнішніх факторів (температура, тиск, концентрація), які можна змінювати без зміни кількості фаз у системі. Якщо варіантність $C = 1$ (моноваріантна система), то можливо зміну одного з факторів у деяких межах, без зміни числа фаз. Якщо варіантність $C = 0$ (нон варіантна система), то зовнішні фактори змінювати не можна без зміни числа фаз в системі Існує математичний зв'язок між числом компонентів (DO), числом фаз (Φ) і варіантністю системи (C). Це *правило фаз* або *закон Гіббса* $C = DO - \Phi + 2$ Якщо прийняти, що всі перетворення відбуваються при постійному тиску, то число змінних зменшиться $C = DO - \Phi + 1$ де: C - число ступенів волі, DO - число компонентів, Φ - число фаз, 1 - урахує можливість зміни температури.

Особливості будови, кристалізації й властивостей сплавів: механічних сумішей, твердих розчинів, хімічних сполук.

Будова металевого сплаву залежить від того, у які взаємодії вступають компоненти, що становлять сплав. Майже всі метали в рідкому стані розчиняються друг у другу в будь-яких співвідношеннях. При утворенні сплавів у процесі їхньому затвердінні можливо різна взаємодія компонентів.

Залежно від характеру взаємодії компонентів розрізняють сплави:

1. механічні суміші;
2. хімічні сполуки;
3. тверді розчини.

Сплави *механічні суміші* утворюються, коли компоненти не здатні до взаємного розчинення у твердому стані й не вступають у хімічну реакцію з утворенням сполуки. Утворюються між елементами значно різняться по будові й властивостям, коли сила взаємодії між однорідними атомами більше чим між різнорідними. Сплав складається із кристалів вхідних у нього компонентів (мал. 18). У сплавах зберігаються кристалічні решітки компонентів.



Рис. 18. Схема мікроструктури механічної суміші

Сплави *хімічні сполуки* утворюються між елементами, що значно різняться по будові й властивостям, якщо сила взаємодії між різнорідними атомами більше, ніж між однорідними.

Особливості цих сплавів:

1. Сталість сполуки, тобто сплав утвориться при певному співвідношенні компонентів, хімічна сполука позначається A_nB_m .
2. Утвориться специфічна, що відрізняється від решіток елементів, що становлять хімічна сполука, кристалічна решітка із правильним упорядкованим розташуванням атомів (мал. 19).
3. Яскраво виражені індивідуальні властивості.
4. Сталість температури кристалізації, як у чистих компонентів.

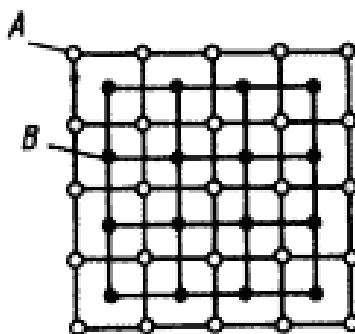


Рис. 19. Кристалічна решітка хімічної сполуки

Сплави *тверді розчини* – це тверді фази, у яких співвідношення між компонентами можуть змінюватися. Є кристалічними речовинами. Характерною рисою твердих розчинів є наявність у їхній кристалічній решітці різнорідних атомів, при збереженні типу решітки розчинника (рис. 20). Твердий розчин складається з однорідних зерен.

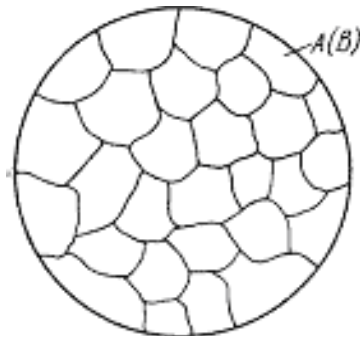


Рис. 20. Схема мікроструктури твердого розчину

Класифікація сплавів твердих розчинів.

По ступенях розчинності компонентів розрізняють тверді розчини:

- с необмеженою розчинністю компонентів;
- с обмеженою розчинністю компонентів.

При необмеженій розчинності компонентів кристалічна решітка компонента розчинника в міру збільшення концентрації розчиненого компонента плавно переходить у кристалічну решітку розчиненого компонента. Для утворення розчинів з необмеженою розчинністю необхідні наступні умови:

1. ізоморфність (однотипність) кристалічних решіток компонентів;
2. близькість атомних радіусів компонентів, які не повинні відрізнятися більш ніж на 8...13 %.
3. близькість фізико-хімічних властивостей подібних по будову валентних оболонок атомів.

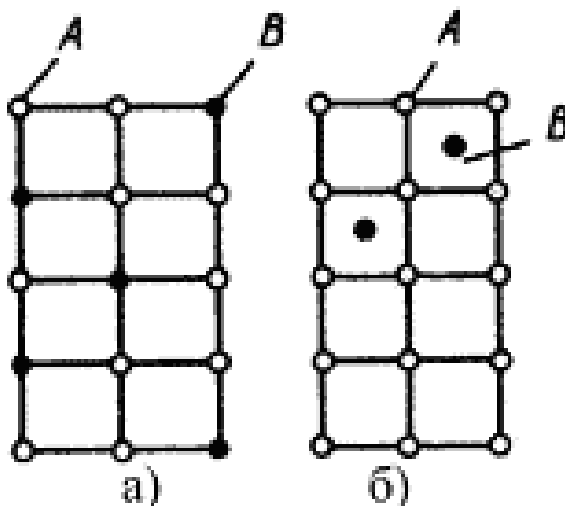
При обмеженій розчинності компонентів можлива концентрація розчиненої речовини до певної межі, при подальшому збільшенні концентрації однорідний твердий розчин розпадається з утворенням двофазної суміші. По характері розподілу атомів розчиненої речовини в кристалічній решітці розчинника розрізняють тверді розчини:

- заміщення;
- впровадження;
- вирахування.

У розчинах заміщення в кристалічній решітці розчинника частина його атомів заміщена атомами розчиненого елемента (мал. 21 а). Заміщення здійснюється у випадкових місцях, тому такі розчини називають неупорядкованими твердими розчинами.

При утворенні розчинів заміщення періоди решітки змінюються залежно від різниці атомних діаметрів розчиненого елемента й розчинника. Якщо атом розчиненого елемента більше атома розчинника, то елементарні осередки збільшуються, якщо менше - скорочуються. У першому наближенні ця зміна пропорційно концентрації розчиненого компонента. Зміна параметрів решітки при утворенні твердих розчинів - важливий момент, що визначає зміна властивостей. Зменшення параметра веде до більшого зміцнення, чим його збільшення. Тверді розчини впровадження утворюються впровадженням атомів розчиненого компонента в пори кристалічної решітки розчинника (мал. 21 б). Утворення таких розчинів, можливо, якщо атоми розчиненого елемента мають малі розміри. Такими є елементи, що перебувають на початку періодичної

системи Менделєєва, вуглець, водень, азот, бор. Розміри атомів перевищують розміри міжатомних проміжків у кристалічній решітці металу, це викликає перекручування решітки й у ній виникають напруги. Концентрація таких розчинів не перевищує 2-2,5%. Тверді розчини вираховання або розчини з дефектною решіткою. утворюються на базі хімічних сполук, при цьому можлива не тільки заміна одних атомів у вузлах кристалічної решітки іншими, але й утворення порожніх, не зайнятих атомами, вузлів у решітці. До хімічної сполуки додають, один із вхідних у формулу елементів, його атоми займають нормальне положення в решітці сполуки, а місця атомів іншого елемента залишаються, незайнятими.



Мал. 21. Кристалічна решітка твердих розчинів заміщення (а), впровадження (б)

Хімічне з'єднання, складна речовина, що складається з хімічно зв'язаних атомів два або декількох різних елементів. Деякі прості речовини також можуть розглядатися як хімічне з'єднання, якщо їх молекули складаються з атомів, сполучених ковалентним зв'язком (наприклад, азот N_2 , кисень O_2 і ін.). Склад хімічне з'єднання записується у вигляді формул хімічних, а будова часто зображається структурними формулами. У переважній більшості випадків хімічне з'єднання підкоряється постійності складу закону і кратних стосунків закону. Проте відомі досить багаточисельні з'єднання змінного складу. Хімічне з'єднання отримують в результаті реакцій хімічних. Хімічне з'єднання супроводиться виділенням або поглинанням енергії. Фізичні і хімічні властивості хімічне з'єднання відрізняються від властивостей речовин, з яких вони отримані. Хімічне з'єднання характеризуються певними значеннями щільності температури плавлення і кипіння і ін. константами. З'єднання, що мають один і той же склад, але різна будова, відрізняються за властивостями. Хімічне з'єднання розділяються на неорганічних і органічних. Відомо більш 100 тис. неорганічних і більше 3 млн. органічних сполук.

Методи побудови діаграм стану сплавів. Основні типи діаграм стану сплавів: з евтектикою чистих компонентів, з евтектикою твердих розчинів, з утворенням хімічних сполук, з необмеженою розчинністю компонентів.

Діаграма стану.

Діаграма стану являє собою графічне зображення стану будь-якого сплаву досліджуваної системи залежно від концентрації й температури (мал. 22)

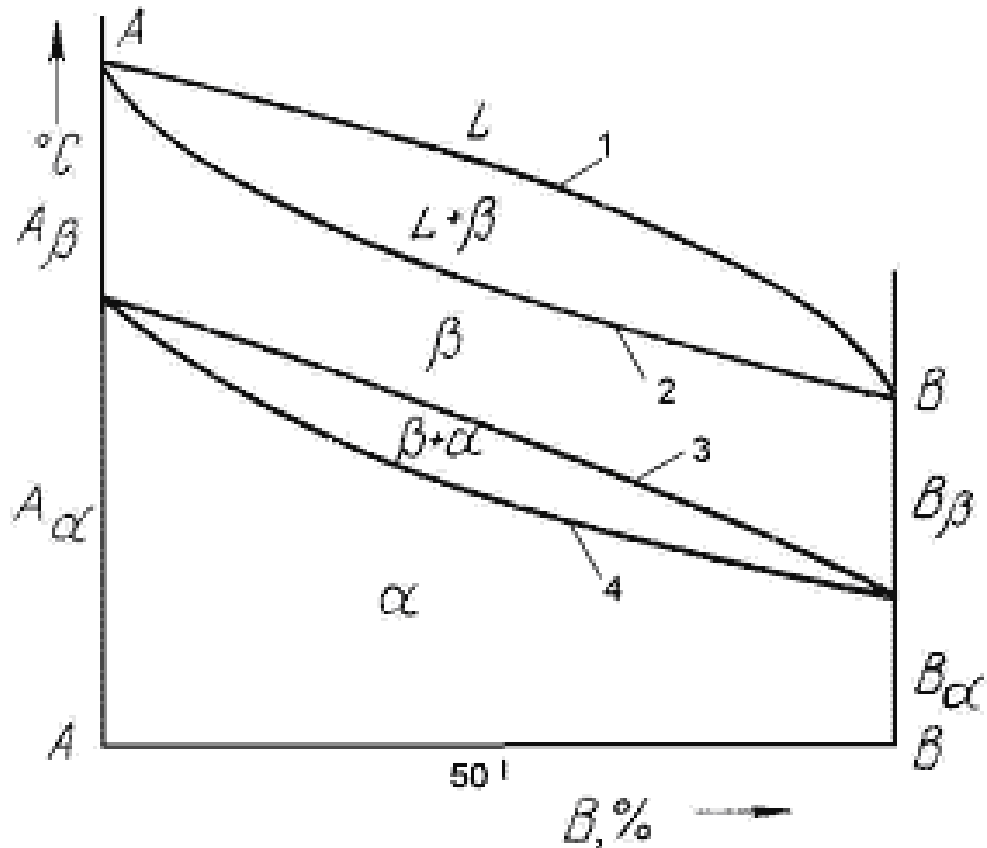


Рис. 22. Діаграма стану

Діаграми стану показують стійкі стани, тобто стану, які за даних умов мають мінімум вільної енергії, і тому її також називають діаграмою рівноваги, тому що вона показує, які за даних умов існують рівноважні фази. Побудова діаграм стану найбільше часто здійснюється за допомогою термічного аналізу. У результаті одержують серію криві охолодження, на яких при температурах фазових перетворень спостерігаються точки перегину й температурні зупинки. Температури, що відповідають фазовим перетворенням, називають критичними точками. Деякі критичні точки мають назви, наприклад, точки кристалізації, що відповідають початку, називають *точками ліквідус*, а кінцю кристалізації - *точками солідус*. По кривих охолодження будують діаграму сполуки в координатах: по осі абсцис - концентрація компонентів, по осі ординат - температура. Шкала концентрацій показує зміст компонента B. Основними лініями є лінії ліквідус (1) і солідус (2), а також лінії відповідним фазовим перетворенням у твердому стані (3, 4). По діаграмі стану можна визначити температури фазових перетворень, зміна фазової сполуки, приблизно, властивості сплаву, види обробки, які можна застосовувати для сплаву.

Діаграми стану двохкомпонентних сплавів.

Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (сплави тверді розчини з необмеженою розчинністю).

Діаграма стану й криві охолодження сплавів системи представлені на мал. 23.

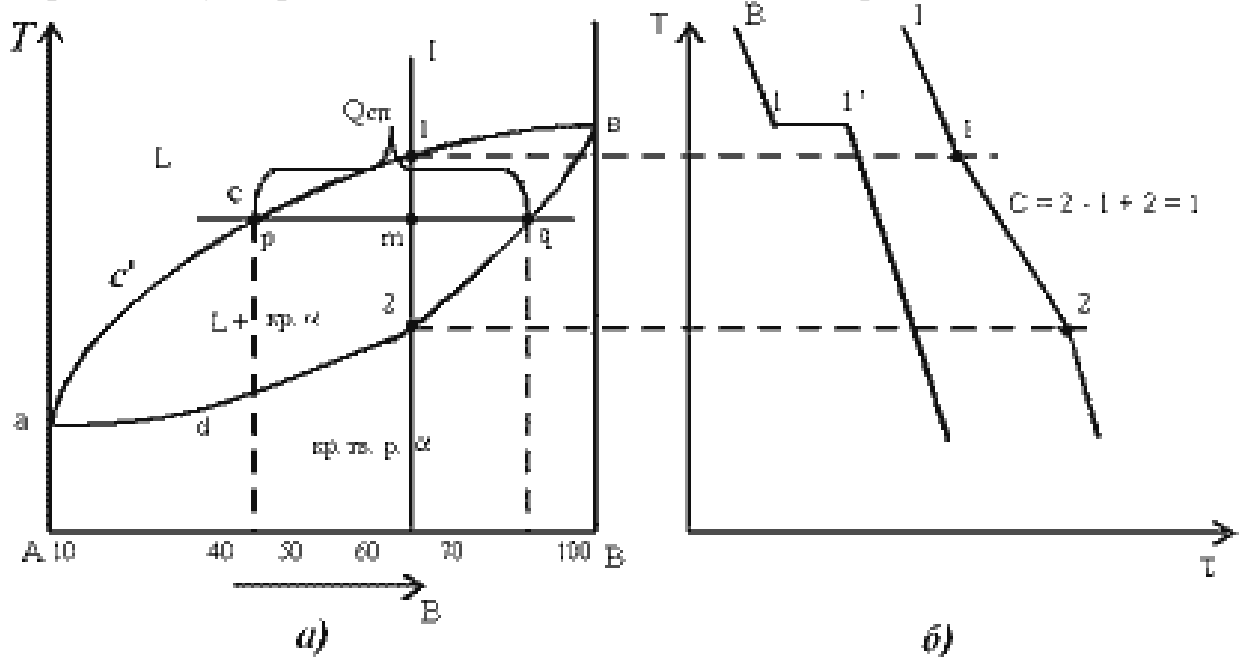


Рис. 23. Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (а); криві охолодження типових сплавів (б)

Спочатку одержують термічні криві. Отримані точки переносять на діаграму, з'єднавши точки початку кристалізації сплавів і точки кінця кристалізації, одержують діаграму стану.

Проведемо аналіз отриманої діаграми.

1. Кількість компонентів: $DO = 2$ (компоненти А і В).

2. Число фаз: $f = 2$ (рідка фаза L, кристали твердого розчину)

3. Основні лінії діаграми:

- acb - лінія ліквідус, вище цієї лінії сплави перебувають у рідкому стані;
- adb - лінія солідус, нижче цієї лінії сплави перебувають у твердому стані.

4. Характерні сплави системи: Чисті компоненти А і В кристалізуються при постійній температурі, крива охолодження компонента В представлена на мал. 23 б. Інші сплави кристалізуються аналогічно сплаву І, крива охолодження якого представлена на мал. 23 б.

Процес кристалізації сплаву І: до точки 1 проохолоджується сплав у рідкому стані. При температурі, що відповідає точці 1, починають утворюватися центри кристалізації твердого розчину. На кривій охолодження відзначається перегин (критична точка), пов'язаний зі зменшенням швидкості охолодження внаслідок виділення схованої теплоти кристалізації. На ділянці 1-2 іде процес кристалізації, що протікає при температурі, що знижується, тому що відповідно до правила фаз у двохкомпонентній системі при наявності двох фаз (рідкої й кристалів твердого розчину) число ступенів волі буде дорівнює одиниці. При досягненні температури відповідній точки 2, сплав твердіє, при подальшому зниженні температури проохолоджується сплав у твердому стані,

що складається з однорідних кристалів твердого розчину. Схема мікроструктури сплаву представлена на мал. 24.

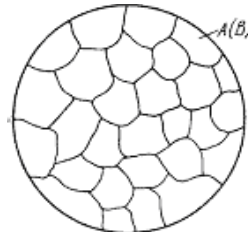


Рис. 24. Схема мікроструктури сплаву - однорідного твердого розчину.

Кількісний структурно-фазовий аналіз сплаву. Користуючись діаграмою стану можна для будь-якого сплаву при будь-якій температурі визначити не тільки число фаз, але і їхня сполука й кількісне співвідношення. Для цього використовується *правило відрізків*. Для проведення кількісного структурно-фазового аналізу через задану точку проводять горизонталь (коноду) до перетинання з найближчими лініями діаграми (ліквідус, солідус або осі компонентів). а) Визначення сполуки фаз у точці m : Для його визначення через точку m проводять горизонталь до перетинання з найближчими лініями діаграми: ліквідус і солідус. Сполука рідкої фази визначається проекцією точки перетинання горизонталі з лінією ліквідус p на вісь концентрації. Сполука твердої фази визначається проекцією точки перетинання горизонталі з лінією солідус q (або віссю компонента) на вісь концентрації. Сполука рідкої фази змінюється по лінії ліквідусу, а сполука твердої фази - по лінії солідуса. Зі зниженням температури сполука фаз змінюється у бік зменшення змісту компонента В. б). Визначення кількісного співвідношення рідкої й твердої фази при заданій температурі (у точці m): Кількісна маса фаз обернено пропорційна відрізкам проведеної коноди. Розглянемо проведеною через точку m коноду і її відрізки. Кількість усього сплаву ($Q_{\text{сн}}$) визначається відрізком pq .

Відрізок, що прилягає до лінії ліквідус pm , визначає кількість твердої

$$Q_{\text{тв}} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\%$$

фази.

Відрізок, що прилягає до лінії солідус (або до осі компонента) mq ,

$$Q_{\text{р}} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$

визначає кількість рідкої фази.

Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у компонентів у твердому стані (механічні суміші)

Діаграма стану й криві охолодження типових сплавів системи представлені на мал. 25.

Проведемо аналіз діаграми стану.

1. Кількість компонентів: $DO = 2$ (компоненти А і В);
2. Число фаз: $f = 3$ (кристали компонента А, кристали компонента В, рідка фаза).
3. Основні лінії діаграми: лінія ліквідус $асб$, складається із двох галузей, що сходяться в одній точці; лінія солідус $есф$, паралельна осі концентрацій прагне до осей компонентів, але не досягає їх;

4. Типові сплави системи:

а) Чисті компоненти, кристалізуються при постійній температурі, на рис 25 б показаний крива охолодження компонент А.

б). *Евтектичний сплав* – сплав, що відповідають концентрації компонентів у точці з (сплав I). Крива охолодження цього сплаву, аналогічна кривим охолодження чистих металів (мал. 25 б).

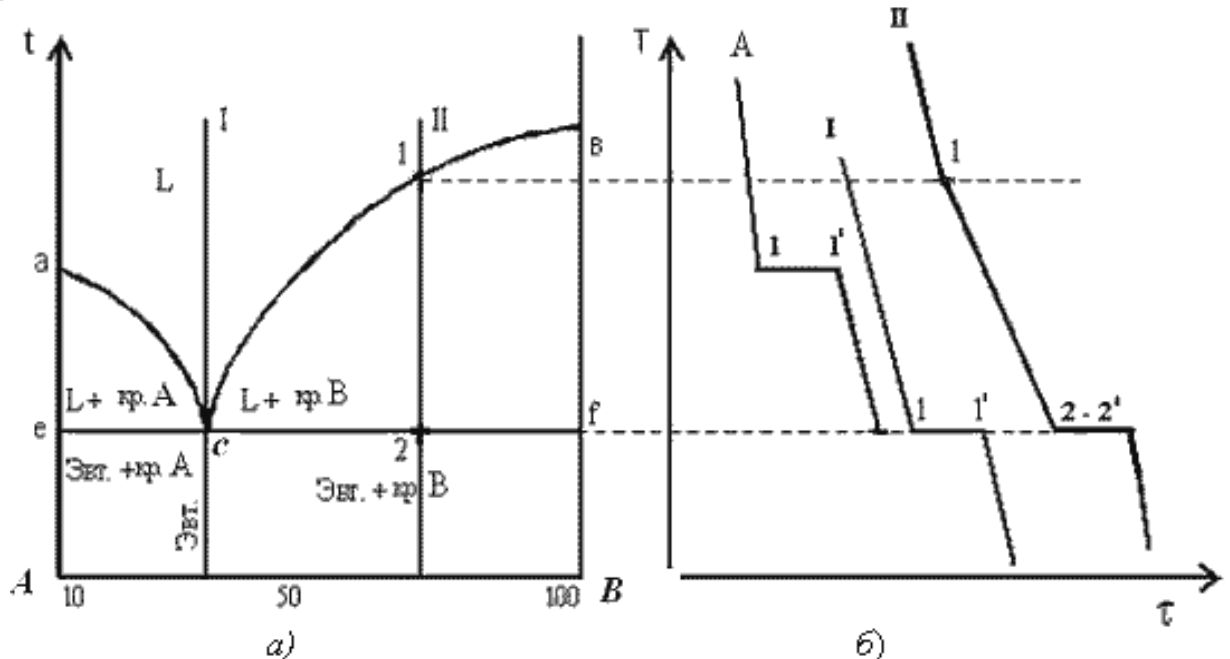


Рис. 25. Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у твердому стані (а) і криві охолодження сплавів (б)

Евтектика – Дрібнодисперсна механічна суміш різнорідних кристалів, що кристалізуються одночасно при постійною, самою низкою для розглянутої системи, температурі. При утворенні сплавів механічних сумішей евтектика складається із кристалів компонентів А и В: Эвт. (кр. А + кр. В).

Процес кристалізації евтектичного сплаву: до точки 1 охолоджується сплав у рідкому стані. При температурі, що відповідає точці 1, починається одночасна кристалізація двох різнорідних компонентів. На кривій охолодження відзначається температурна зупинка, тобто процес іде при постійній температурі, тому що відповідно до правила фаз у двохкомпонентній системі при наявності трьох фаз (рідкої й кристалів компонентів А и В) число ступенів волі буде дорівнює нулю ($C = 2 - 3 + 1 = 0$). У точці 1 процес кристалізації завершується. Нижче точки 1' проохолоджується сплав, що складається з дисперсних різнорідних кристалів компонентів А и В.

Процес кристалізації сплаву II: до точки 1 проохолоджується сплав у рідкому стані. При температурі, що відповідає точці 1, починають утворюватися центри кристалізації надлишкового компонента В. На кривій охолодження відзначається перегин (критична точка), пов'язаний зі зменшенням швидкості охолодження внаслідок виділення схованої теплоти кристалізації. На ділянці 1–2 іде процес кристалізації, що протікає при температурі, що знижується, тому що відповідно до правила фаз у двохкомпонентній системі при наявності двох фаз (рідкої й кристалів

компонента В) число ступенів волі буде дорівнює одиниці ($C = 2 - 2 + 1 = 1$). При охолодженні сполука рідкої фази змінюється по лінії ліквідус до евтектичного. На ділянці 2–2 кристалізується евтектика (див. кристалізацію евтектичного сплаву). Нижче точки 2 охолоджується сплав, що складається із кристалів надлишкового компонента, що спочатку закристалізувався, У і евтектики. Схема мікроструктури сплаву представлена на мал. 26.

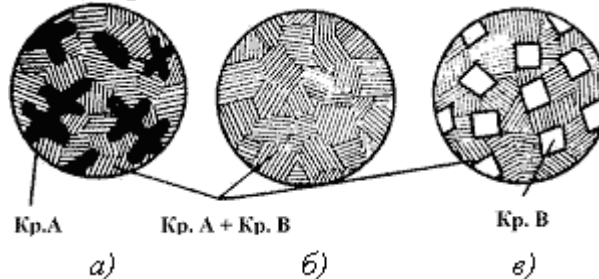


Рис. 26. Схема мікроструктур сплавів: а - доевтектичного, б - евтектичного, в - заевтектичного.

При проведенні кількісного структурно-фазового аналізу, конода, проведена через задану точку, перетинає лінію ліквідус і осі компонентів, тому сполука твердої фази або 100 % компонента А, або 100 % компонента В.

Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані.

Діаграма стану й криві охолодження типових сплавів системи представлені на мал. 27.

Кількість компонентів: $ДО = 2$ (компоненти А і В); 2.

Число фаз: $f = 3$ (рідка фаза й кристали твердих розчинів (розчин компонента В у компоненту А) і (розчин компонента А в компоненту В));

Основні лінії діаграми:

- лінія ліквідус асб, складається із двох галузей, що сходяться в одній точці;
- лінія солідус адсб, складається із трьох ділянок;
- dm - лінія граничної концентрації компонента В у компоненту А;
- fn - лінія граничної концентрації компонента А в компоненту В.

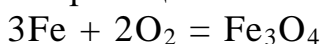
Залізо і його властивості. Діаграма стану Fe-C. Фазовий склад, структурні складові Fe-C сплавів, їх властивості.

1. Фізичні властивості заліза залежать від ступеню його чистоти. Чисте залізо є досить пластичним металом сріблясто-білого кольору. Густина заліза становить $7,87 \text{ г/см}^3$. Температура плавлення становить 1539°C . На відміну від багатьох інших металів, залізо виявляє магнітні властивості.

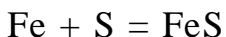
Чисте залізо на повітрі є досить стійким. У практичній діяльності залізо, що застосовується, містить домішки. При нагріванні залізо є досить активним відносно багатьох неметалів. Розглянемо хімічні властивості заліза на прикладі взаємодії з типовими неметалами: киснем та сіркою.

При згорянні заліза у кисні утворюється сполука Феруму з Оксигеном, яка отримала назву залізна окалина. Реакція

супроводжується виділенням тепла та світла. Складемо рівняння хімічної реакції:



При нагріванні залізо бурхливо реагує з сіркою з утворенням ферум (II) сульфїду. Реакція також супроводжується виділенням тепла та світла. Складемо рівняння хімічної реакції:



Залізо широко застосовується в промисловості та побуті. Залізний вік – епоха в розвитку людства, яка почалася на початку першого тисячоліття до нашої ери у зв'язку з розповсюдженням виплавлення заліза та виготовлення залізного знаряддя праці та військової зброї. Залізний вік прийшов на зміну бронзовому віку. Сталь уперше з'явилася в Індії у десятому столітті до нашої ери, чавун – тільки у середні віки. Чисте залізо використовують для виготовлення сердечників трансформаторів і електромагнітів, а також у виробництві спеціальних сплавів. Найбільше на практиці використовують сплави заліза: чавун і сталь. Чавун застосовується у виробництві лиття та сталі, сталь – як конструкційний та інструментальний матеріали, які виявляють стійкість до корозії.

Під впливом кисню повітря та вологи залізні сплави перетворюються на іржу. Продукт іржавіння можна описати хімічною формулою $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Одна шоста частина чавуну, що виплавляється, гине від іржавіння, тому питання боротьби з корозією є досить актуальним.

Методи захисту від корозії досить різноманітні. Найважливіші з них: захист поверхні металу покриттям, створення сплавів з антикорозійними властивостями, електрохімічні засоби, зміна складу середовища. Захисні покриття поділяють на дві групи: металічні (покриття заліза цинком, хромом, нікелем, кобальтом, міддю) та неметалічні (лаки, фарби, пластмаси, гума, цемент). При введенні до складу сплавів спеціальних добавок одержують нержавіючу сталь.

Діаграма стану залізовуглецевих сплавів.

Компоненти і фази системи залізо – вуглець

Компонентами залізовуглецевих сплавів є два хімічні елементи — **залізо** та **вуглець**.

Залізо.

Чисте електролітичне **залізо** – це м'який пластичний метал світлого кольору зі щільністю $7,85 \text{ г/см}^3$ ($7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), температурою плавлення $1539 \text{ }^\circ\text{C}$. Йому властива добра пластичність, невисока міцність і низька твердість. Воно має границю міцності $\sigma_{\text{в}}=250\text{...}280 \text{ МПа}$, відносне видовження $\delta=50 \text{ \%}$, відносне звуження $\psi=80 \text{ \%}$, твердість 80 НВ і ударну в'язкість $a_{\text{н}}=3000 \text{ кДж/м}^2$. Залізо зберігає магнетизм до температури $768 \text{ }^\circ\text{C}$ і є феромагнітним. Під час нагрівання і охолодження в залізі відбуваються одне магнітне перетворення за температури $768 \text{ }^\circ\text{C}$ і два поліморфних за 911 та $1392 \text{ }^\circ\text{C}$.

Альфа-залізо (Fe_α) існує в двох інтервалах температур: нижче за $911\text{ }^\circ\text{C}$ та $1392\text{...}1539\text{ }^\circ\text{C}$. В інтервалі температур $911\text{...}1392\text{ }^\circ\text{C}$ існує γ -залізо (Fe_γ).

Кристалічні ґратки заліза здатні розчиняти різні елементи, утворюючи з металами розчини заміщення, а з неметалами (C, N, H) – розчини втілення. Розчинність вуглецю в залізі значно залежить від типу кристалічних ґраток заліза і його температури. За кімнатної температури в Fe_α розчиняється $0,006\%$ C, а за $727\text{ }^\circ\text{C}$ – $0,025\%$ C. Твердий розчин вуглецю в Fe_α називають феритом (ліва частина діаграми від 0 до $911\text{ }^\circ\text{C}$ (QPG)).

Вуглець.

Вуглець може перебувати в сплавах у цементиті Fe_3C , у твердих розчинах проникнення, а також у вигляді графіту.

Вуглець утворює декілька алотропних видозмін. Серед них природні: алмаз, графіт, лонсдейліт, фулерен, вуглецеві нанотрубки та штучні: карбін, графен та аморфний вуглець у вигляді сажі і деревного вугілля.

Кристалічні форми

- Алмаз
- Графен
- Графіт
- Карбін
- Лонсдейліт
- Наноалмаз
- Фулерен
- Фулерит
- Вуглеволокно
- Вуглецеві нановолокна
- Вуглецеві нанотрубки

Аморфні форми

- Активоване вугілля
- Деревне вугілля
- Викопне вугілля: антрацит та ін.
- Кокс кам'яновугільний, нафтовий та ін.
- Скловуглець
- Техвуглець
- Сажа
- Вуглецева нанопіна

На практиці, як правило, перераховані вище аморфні форми є хімічними сполуками з високим вмістом вуглецю, а не чистою алотропною формою вуглецю.

Кластерні форми

- Астралени
- Дивуглець
- Вуглецеві наноконуси

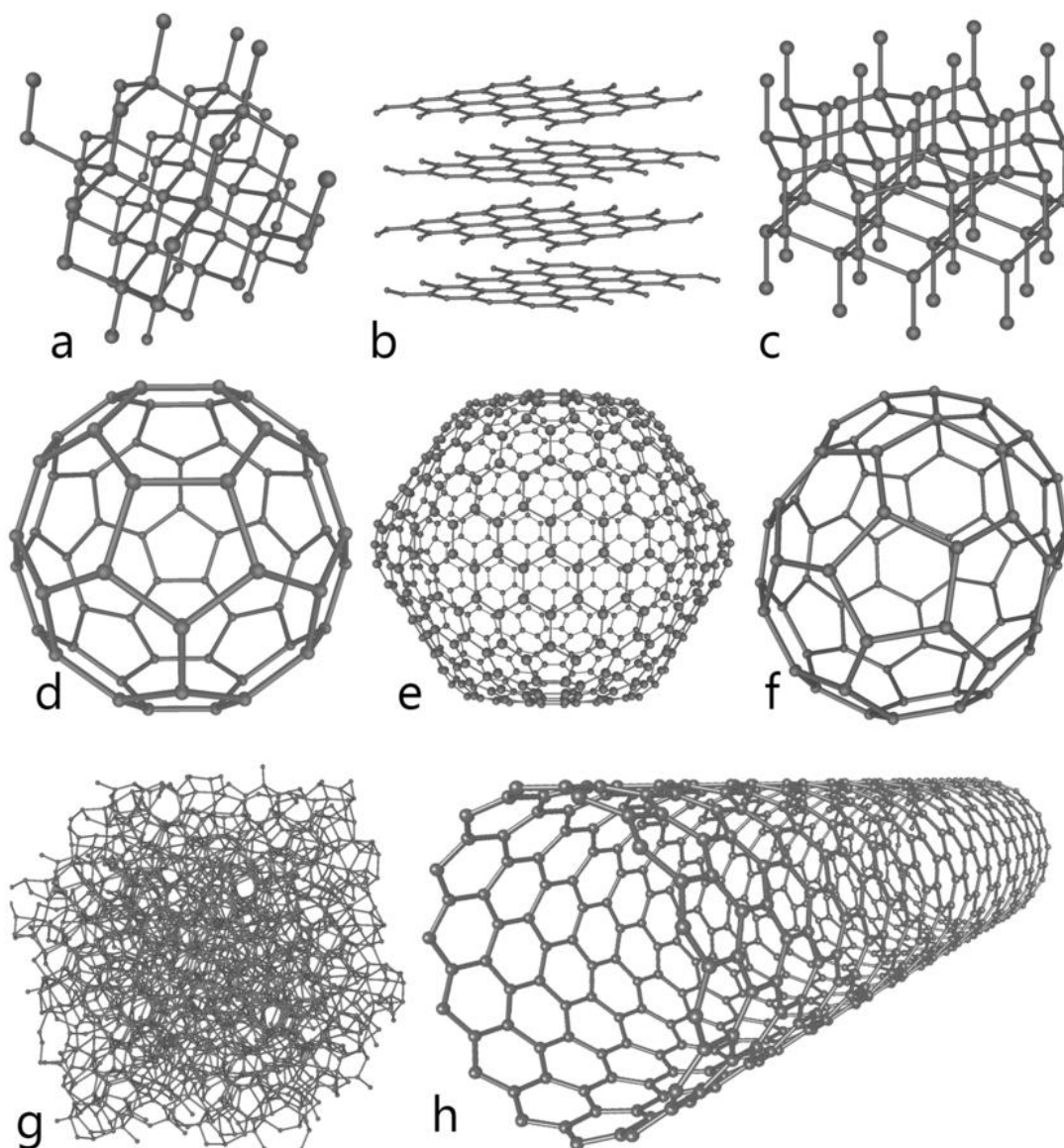


Рис.27. Алотропні модифікації:

a) алмаз, **b)** графіт (графен) **c)** лонсдейліт **d)** фулерен (C60) **e)** C540 **f)** C70
g) аморфний вуглець **h)** вуглецеві нанотрубки

Алмаз

Алмаз — прозора, безбарвна або трохи забарвлена домішками в різноманітні відтінки кристалічна речовина. Для відшліфованих алмазів, діамантів, характерна особлива гра світла, зумовлена сильним заломленням на гранях.

В алмазі кожен атом вуглецю утворює ковалентні зв'язки із чотирма іншими атомами. Як наслідок утворюється гранецентрована кубічна структура із двох підґраток, що отримала назву структури алмазу. Така структура характерна також для інших елементів 14 підгрупи періодичної таблиці: кремнію та германію.

Алмаз — найтвердіша речовина серед усіх відомих, навіть міцніша за обсидіан. Завдяки своїй надзвичайній твердості він широко застосовується при бурінні твердих гірських порід, обробці твердих металів, виробництві абразивів тощо. Відшліфовані безбарвні кристали алмазу — діаманти —

коштовні прикраси.

Найбільші родовища алмазів розташовано в Південній Африці та в Якутії. Щорічний світовий видобуток алмазу становить приблизно 300 кг. В останні роки алмаз почали одержувати штучно при дуже високих тисках і високій температурі.

Графіт

Графіт — темно-сіра непрозора дрібнокристалічна речовина, жирна на дотик. На відміну від алмазу графіт добре проводить електричний струм та тепло і дуже м'який.

Графіт у великих кількостях одержують штучно — нагріванням коксу або антрациту в спеціальних електричних печах при температурі близько 3000 °С і підвищеному тиску без доступу повітря. Штучний графіт відзначається високою чистотою і м'якістю. За своїми властивостями він кращий за природний. Графіт широко застосовується для виготовлення електродів, в суміші з глиною для виробництва вогнетривких тиглів. З графіту роблять звичайні олівці. В суміші з мінеральними оливами його використовують як мастило для машин, що працюють при підвищених температурах.

Різка відмінність у фізичних властивостях алмазу і графіту зумовлена різною кристалічною будовою. В кристалах алмазу кожний атом вуглецю оточений чотирма іншими атомами, розміщеними на однаковій віддалі один від одного. В кристалах графіту атоми вуглецю розміщені у кутах правильних шестикутників в одній площині і утворюють окремі шари. Віддаль між окремими шарами більша, ніж між атомами в тому ж шарі. Внаслідок цього зв'язок між окремими шарами значно слабший, ніж між атомами того ж шару. Тому кристали графіту легко розщеплюються на окремі лусочки, які самі по собі досить міцні.

Графен

Графен за своєю будовою — двовимірна алотропна модифікація вуглецю, утворена шаром атомів вуглецю товщиною в один атом, з'єднаних за допомогою sp^2 зв'язків в гексагональну двовимірну кристалічну ґратку (окремий атомний шар зі структурою графіту) — атоми вуглецю утворюють сотову структуру з міжатомною віддаллю 142 пм. Без опори графен має тенденцію згортатися, але може бути стійким на підкладинці.

Карбін

Кристалічна модифікація вуглецю гексагональної сингонії з ланцюговою будовою молекул називається карбін. На вигляд дрібнокристалічний порошок чорного кольору (густина 1,9—2 г/см³). Карбін — лінійний полімер вуглецю. Кристалічна структура карбіну характеризується наявністю довгих ланцюжків із атомів вуглецю, розташованих паралельно. У молекулі карбіну атоми вуглецю з'єднані в ланцюжки по черзі чи потрійними і одинарними зв'язками (поліенова будова ($-C\equiv C-$)), або постійно подвійними зв'язками (полікумуленова будова ($=C=C=$)). Відомо кілька форм карбіну, що відрізняються числом атомів в елементарній комірці, розмірами комірок і густиною (2,68-3,30 г/см). Карбін зустрічається в природі у вигляді

мінералу чаоіту (білі прожилки і вкраплення в графіті), а також отриманий штучних умовах з довгих ланцюжків атомів вуглецю, укладених паралельно один одному — окисною дегідрополіконденсацією ацетилену, дією лазерного випромінювання на графіт, з вуглеводнів або CCl_4 в низькотемпературній плазмі. Ця речовина вперше була отримана радянськими хіміками В.В. Коршак, А.М. Сладкова, В.І. Касаточкіним і Ю.П. Кудрявцевим на початку 60-х рр. в Інституті елементоорганічних сполук Академії наук СРСР^[16]. Карбін володіє напівпровідниковими властивостями, причому під впливом світла його провідність сильно збільшується. На цій властивості засновано перше практичне застосування — в фотоелементах.

Фулерен

Фулерен — специфічна структура із атомів вуглецю, відкрита в середині 1980-х, молекула якої має вигляд м'яча. Як в графіті, кожен атом вуглецю на поверхні сполучений із трьома іншими. На відміну від графіту, атоми утворюють не тільки шести, а й п'ятикутники. Внутрішня частина молекули порожня, що зумовлює широкі можливості для одержання на основі фулерену сполук включення.

Вуглецеві нанотрубки

Вуглецеві нанотрубки — це ще одна нещодавно відкрита специфічна структура, що складається із одного або кількох скручених у трубку графітних шарів. Діаметр таких трубок близько 1—10 нанометрів. Нанотрубки мають унікальні фізичні властивості, зокрема високу міцність на розрив, адсорбційну здатність. Вони активно досліджуються і мають великі перспективи для використання. Вуглецеві нанотрубки виявлені у природі (шунгіт), їх також штучно вирощують у лабораторіях.

Аморфний вуглець

В основі будови аморфного вуглецю лежить неупорядкована структура монокристалічного (завжди містить домішки) графіту. В такій видозміні він існує у вигляді сажі, коксу, деревного вугілля тощо. У природі ця алотропна видозміна не зустрічається. Її одержують штучно з різних сполук, що містять вуглець. Аморфний вуглець, або просто аморфне вугілля, насправді є кристалічним, але його кристалики такі малі, що їх не видно навіть у мікроскоп. Фізичні властивості «аморфного» вуглецю значною мірою залежать від дисперсності частинок та від наявності домішок.

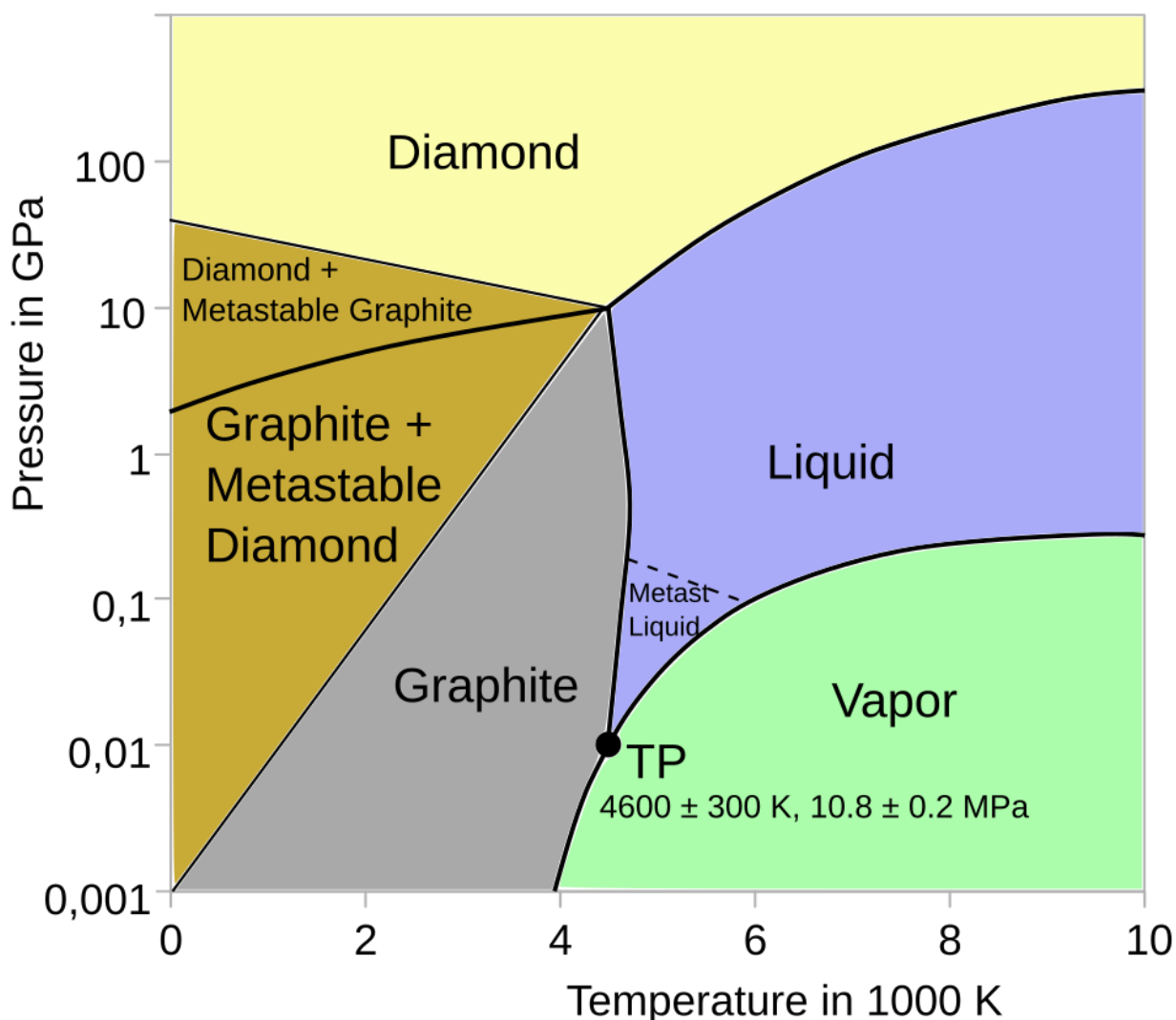
Найважливішими технічними сортами аморфного вуглецю є сажа і деревне вугілля. Сажа — найчистіший аморфний вуглець. У промисловості сажу одержують здебільшого термічним розкладом метану, а також при спалюванні різних органічних речовин при недостатньому доступі повітря. Сажу широко застосовують як наповнювач у виробництві гуми з каучуку, а також для виготовлення друкарських фарб, туші тощо. Деревне вугілля добувають нагріванням дерева без доступу повітря у спеціальних печах. Його застосовують у металургії для одержання високих сортів чавуну і сталі, в ковальській справі, для виготовлення чорного порошу і як адсорбент.

Лонсдейліт

Лонсдейліт виявлено в метеоритах і отримано штучно; його структура та фізичні властивості остаточно не встановлено.

Ультрадисперсні алмази (наноалмази)

У 1980-х рр. в СРСР було виявлено, що в умовах динамічного навантаження вуглецевмісних матеріалів можуть утворюватися алмазоподібні структури, що отримали назву ультрадисперсних алмазів (УДА). Наразі все частіше застосовується термін «наноалмази». Розмір часток в таких матеріалах складає одиниці нанометрів. Умови утворення УДА можуть бути реалізовані при детонації вибухових речовин зі значним негативним кисневим балансом, наприклад, сумішей тротилу з гексогеном. Такі умови можуть бути реалізовані також при ударах небесних тіл об поверхню Землі в присутності вуглецевмісних матеріалів (органіка, торф, вугілля та ін.). Так, в зоні падіння Тунгуського метеорита в лісовій підстилці були виявлені УДА.



Спрощена фазова діаграма вуглецю, заштриховані області де алотропні модифікації можуть бути метастабільні. (diamond — алмаз, graphite — графіт, liquid — рідина, vapor — газ)

Фізичні властивості

Вуглець існує в багатьох алотропних модифікаціях з дуже різноманітними фізичними властивостями. Різноманітність модифікацій обумовлено здатністю вуглецю утворювати хімічні зв'язки різного типу. Різні алотропні видозміни вуглецю мають різні провідні властивості. Алмаз є широкозонним напівпровідником, практично ізолятором. Завдяки широкій забороненій зоні, алмаз не поглинає видиме світло, незначне поглинання зумовлене наявністю домішок. На відміну від алмазу графіт є непоганим провідником електричного струму. Для нього також характерний металевий блиск. За нормальних умов термодинамічно стійкий лише графіт, а алмаз та інші форми метастабільні. При атмосферному тиску і температурі вище 1200 К алмаз починає переходити в графіт, вище 2100 К перетворення відбувається за секунди. ΔH_0 переходу — 1,898 кДж/моль. При нормальному тиску вуглець сублимується при 3780 К. Рідкий вуглець існує лише при певному зовнішньому тиску. Потрійна точка: графіт-рідина-пара $T = 4130$ К, $p = 10,7$ МПа. Прямий перехід графіту в алмаз відбувається при 3000 К і тиску 11—12 ГПа.

При тиску понад 60 ГПа припускають утворення вельми щільної модифікації С III (густина на 15—20 % вище густини алмазу), що має металеву провідність. При високих тисках і відносно низьких температурах (близько 1200 К) з високоорієнтованого графіту утворюється гексагональна модифікація вуглецю з кристалічною ґраткою типу вюртцита — лонсдейліт ($a = 0,252$ нм, $c = 0,412$ нм, просторова група $R\bar{6}_3/mmc$), густина 3,51 г/см³, тобто така ж, як і у алмазу.

Структура

Електронні орбіталі атома вуглецю можуть мати різну геометрію, залежно від ступеня гібридизації його електронних орбіталей. Існує три основних геометрії атома вуглецю:

- Тетраедрична, утворюється при змішуванні одного s- та трьох p-електронів (sp^3 гібридизація). Атом вуглецю знаходиться в центрі тетраедра, зв'язаний чотирма еквівалентними σ -зв'язками з атомами вуглецю або іншими в вершинах тетраедра. Такій геометрії атому відповідають алотропні модифікації вуглецю алмаз і лонсдейліт. Такою гібридизацією володіє вуглець, наприклад, в метані та інших вуглеводнях.

- Тригональна, утворюється при змішуванні одного s- та двох p-електронів (sp^2 гібридизація). Атом вуглецю має три рівноцінні σ -зв'язки, розташовані в одній площині під кутом 120° один до одного. Не беруча участі у гібридизації p-орбіталь, розташована перпендикулярно площині σ -зв'язків, використовується для утворення π -зв'язків з іншими атомами. Така геометрія вуглецю характерна для графіту, фенолу та ін.

- Дігональна, утворюється при змішуванні одного s- та одного p-електронів (sp -гібридизація). При цьому дві електронні хмари витягнуті уздовж одного напрямку і мають вигляд несиметричних гантелей. Два інших p-електрона дають π -зв'язки. Вуглець з такою геометрією атома утворює особливу алотропну модифікацію — карбін.

У 2010 році співробітники університету Ноттінгема Стівен Лідл і колеги отримали сполуку (мономерний ділітію метандій), в якому чотири зв'язки атома вуглецю знаходяться в одній площині. Раніше можливість «плоского вуглецю» була передбачена Паулем фон Шлейером для речовини H_2CLi_2 , але вона не була синтезована.

Хімічні властивості

За звичайних умов вуглець хімічно інертний, при високих температурах з'єднується з багатьма елементами, проявляє сильні відновні властивості. Хімічна активність різних форм вуглецю зменшується в ряді: аморфний вуглець, графіт, алмаз, на повітрі вони спалахують при температурах відповідно вище 300—501 °С, 600—700 °С і 850—1000 °С. Найважливіша властивість вуглецю — здатність його атомів утворювати міцні хімічні зв'язки як між собою, так і з іншими елементами. Здатність вуглецю утворювати 4 рівнозначні валентні зв'язки з іншими атомами дозволяє будувати вуглецеві скелети різних типів (лінійні, розгалужені, циклічні); саме цими властивостями і пояснюється виняткова роль вуглецю в будові органічних сполук і, зокрема, всіх живих організмів.

Сполуки

Атоми вуглецю утворюють міцні ковалентні зв'язки з іншими атомами вуглецю. Завдяки цьому вони можуть утворювати ланцюжки й циклічні структури, забезпечуючи велику різноманітність хімічних сполук. Сполуки вуглецю поділяють на неорганічні й органічні.

Назва *органічна сполука* склалася історично. Так називали хімічні сполуки, що траплялися тільки в живій природі. Вважалося, що вони принципово відрізняються від неорганічних сполук. Однак, розвиток хімії та синтез органічних сполук із неорганічних складових довели, що принципової відмінності органічних сполук від неорганічних немає. Деякі прості сполуки вуглецю можна віднести як до органічних, так і до неорганічних.

До *фаз системи* залізо-вуглець належать: рідкий розчин Р, ферит Ф, аустеніт А і цементит Ц.

Рідкий розчин Р — однорідна рідина, що складається із заліза та вуглецю. Рідкий розчин існує як окрема фаза над лінією ліквідусу, а між лініями ліквідусу та солідусу він перебуває у рівновазі з кристалічною фазою (феритом, аустенітом або цементитом).

Ферит Ф — твердий розчин проникнення вуглецю в α -залізі. Максимальна розчинність вуглецю у фериті становить 0,02 %. Така незначна розчинність пояснюється малими розмірами порожнин в об'ємноцентрованому кубі заліза проти розмірів атома вуглецю.

Аустеніт А — твердий розчин проникнення вуглецю в γ -залізі з максимальною розчинністю 2,14 % С. Атом вуглецю може перебувати в центрі ГЦК. Аустеніт не магнітний, досить пластичний і має твердість за Брінеллем в межах 170... 220.

Цементит Ц — хімічна сполука заліза з вуглецем (Fe_3C — карбід заліза), що утворюється при відповідному стехіометричному співвідношенні атомів заліза і

вуглецю яка відповідає концентрації вуглецю 6,67 %. Це найтвердіша (800 НВ) і дуже крихка фаза в сплавах залізо-вуглець. Щільність цементиту 7,82 г/см³, температура плавлення 1250 °С.

Цементит феромагнітний до температури 217 °С і здатний утворювати тверді розчини заміщення. Атоми вуглецю в кристалічній орторомбічній ґратці цементиту (рис. 27) можуть заміщатися атомами азоту, кисню, а атоми заліза – атомами мангану, хрому, вольфраму та іншими металами. Цементит – нестійка хімічна сполука, яка під час нагрівання розпадається з утворенням вуглецю у вигляді графіту.

Перліт П – механічна суміш (евтектоїд) ферриту та цементиту, яка утворюється при евтектоїдному розпаді аустеніту (0,8% С).

Ледебурит Л (4,3% С) – механічна суміш (евтектика) аустеніту або перліту та цементиту. Нижче 727 °С аустеніт перетворюється у перліт, при цьому утворюється суміш перліту та цементиту.

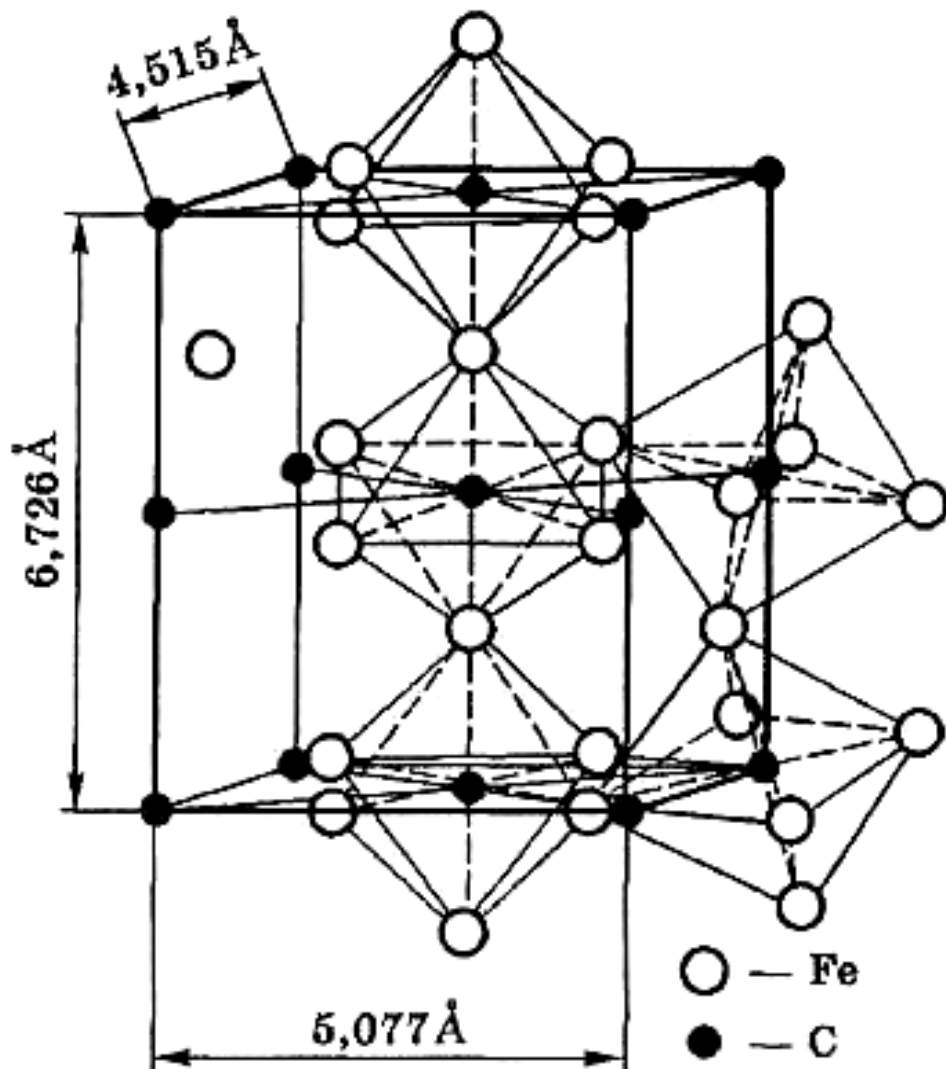


Рис. 27. Кристалічна орторомбічна ґратка цементиту

Діаграма стану залізовуглецевих сплавів Діаграма стану залізо - вуглець

Діаграма стану залізо-вуглець охоплює залізовуглецеві сплави, які містять від 0 до 6,67 % С. Сплави з концентрацією вуглецю, що перевищує 6,67 %, практично не використовуються через їхні незадовільні механічні властивості.

Діаграма залізо-цементит (рис. 28) дає уявлення про будову вуглецевих сплавів – сталей і чавунів, та є основою для з'ясування процесів, що проходять при нагріванні і охолодженні залізовуглецевих сплавів (сталей і чавунів). У залізовуглецевих сплавах при нагріванні або охолодженні утворюються такі структурні складові: ферит, аустеніт, цементит, перліт та ледебурит. У таблиці 9 подано характеристику структурних складових залізовуглецевих сплавів.

Діаграму залізо — вуглець характеризує структурні перетворення, які відбуваються в залізовуглецевих сплавах при їх охолодженні. По лінії *ліквідус ACD* маємо початок, а на лінії *солідус AECF* — кінець кристалізації. Тут на ділянці *AC* лінії ліквідус рідкий розчин переходить в аустеніт, а на ділянці *CD* — у цементит первинний *Ц_I*. Кристалізація аустеніту закінчується на ділянці *AE* лінії солідус. При температурі 1147 °С (лінія *ECF*) з рідкого розчину *P* концентрації складу точки *C* (4,3 % С) утворюється дрібна механічна суміш – ледебурит. Отже, на лінії солідус закінчується *первинна кристалізація* і нижче від цієї лінії починається *вторинна кристалізація*.

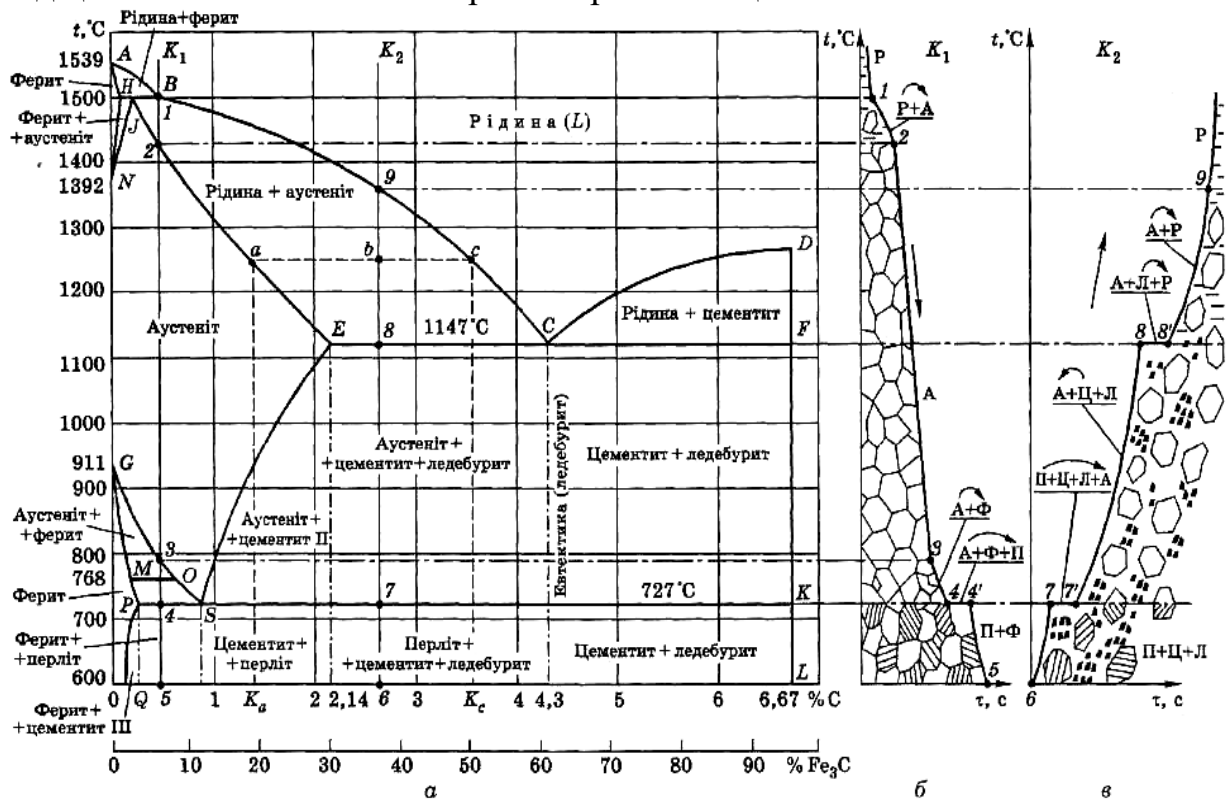


Рис. 28. Діаграма стану залізовуглецевих сплавів (залізо-цементит) (а); крива охолодження сплаву K1 (б); крива нагрівання сплаву K2 (в)

Вторинна кристалізація зумовлена поліморфізмом заліза та температурною зміною розчинності вуглецю в аустеніті. На лінії *GS* аустеніт перетворюється у ферит.

Розчинність вуглецю в аустеніті і фериті залежить від температури. Зі зниженням температури від 1147 °С (точка *E*) до 727 °С (точка *S*) максимальна розчинність вуглецю в аустеніті зменшується від 2,14 до 0,8 %. Вуглець виділяється із γ -заліза з утворенням **вторинного цементиту Цц**. Таке перетворення називають евтектоїдним (розпад твердого розчину). В результаті цього розпаду утворюється дуже дрібна двофазова феритно-цементитна структура фериту і цементиту, яка називається **перлітом П**. Це перетворення завершується по лінії **PSK**.

При аналізі розглядаються лінії і точки діаграми (табл. 8 і 10), застосовуються правила фаз та відрізків.

Для визначення ступеня вільності використовують закон Гібса за рівнянням: $C=K-\Phi+n$, де K – кількість компонентів; Φ – кількість фаз; $n=1$ – кількість зовнішніх чинників (температура).

Вище лінії *ABCD* всі сплави знаходяться в рідкому стані і число ступенів волі $C=K-\Phi+1=2-1+1=2$ (рис. 28). Це означає, що сплави можна нагрівати і охолоджувати, змінювати їх концентрацію і вони залишаються рідкими в стані рівноваги.

Між лініями *ABC* та *AHJEC* і лініями *CD* та *CF* сплави двофазні, складаються із твердої фази і рідини, при цьому число ступенів волі дорівнює $C=2-2+1=1$ (табл. 8). Із вищевикладеного виходить, що система в даних областях має один ступінь волі і для зберігання її рівноваги можна змінювати лише один фактор рівноваги - температуру або концентрацію. Дві фази і один ступінь волі є також у всіх інших областях діаграми окрім аустенітної, де між лініями *NHJEC* і *GSE* система однофазна і має два ступеня волі $C=2-1+1=2$.

На горизонтальних лініях *ECF* і *PCK* система трифазна і число ступенів волі $C=2-3+1=0$ (табл. 8). На лінії *ECF* за охолодження утворюється ледебурит, а на лінії *PSK* – перліт. Нульовий ступінь волі на цих лініях обумовлює суворо постійні температури при утворенні ледебуриту (1147 °С) і перліту (727 °С). Із таблиці 10 видно, що дві фази і один ступінь волі мають усі криві лінії і точки *A*, *D*, *G*, *Q*; три фази і нульовий ступінь волі – точки *P*, *S*, *E*, *C*; в точках *K* і *F* фазових перетворень немає.

Правилом відрізків або правилом важеля користуються для визначення відсоткового і вагового складу рідкої і твердої фаз або двох різних твердих фаз (кількість структурних складових та їх концентрації).

Для цього, наприклад, із точки *b* (рис. 29) проводять горизонталь до ліній *GP* і *GS*. Проекція точки *a* на вісь концентрацій показує вміст вуглецю в фериті, а проекція точки *c* – вміст вуглецю в аустеніті за певної температури.

Для визначення кількісного відношення аустеніту і фериту необхідно скласти обернено пропорційне відношення відрізків: $\frac{Q_{фер}}{Q_{ауст}} = \frac{bc}{ab}$,

де $Q_{фер}$ – кількість фериту; $Q_{ауст}$ – кількість аустеніту для температури, що відповідає точці *b*.

Нехай у точці b маса всього сплаву становить 100 %, тоді $Q_{фер}/(100-Q_{фер}) = \frac{bc}{ab}$. Підставляючи значення відрізків bc і ab , що визначені з діаграми стану, можна вирахувати кількість фериту, а потім і кількість аустеніту.

Візьмемо для прикладу сплав із вмістом вуглецю 2,7 % та визначимо відсотковий і ваговий склад рідкої і твердої (аустеніт) фаз, кількість структурних складових та їх концентрації за температури = 1250 °C (рис. 28 а).

Для цього через точку b (див. рис. 28, а) проводимо горизонтальну лінію до перетину її з лініями ABC і JE , що обмежують зону діаграми $Fe - Fe_3C$, отримавши на них точки a і c . Проекція точки b на вісь концентрації покаже вміст вуглецю в сплаві K_2 , проекція точки a – вміст вуглецю в аустеніті, а проекція точки c – у рідкій фазі (L) за заданої температури. При зміні температури сплаву K_2 , зміниться концентрація вуглецю у відповідних фазах (аустеніті і рідкій фазі).

Отже, отримуємо $a = 1,4 \%C$, $b = 2,7 \%C$, $c = 3,6 \%C$.

Щоб визначити кількісне співвідношення аустеніту і рідкої фази (кількості фаз) у точці b , потрібно взяти співвідношення відрізків ab і bc зворотно пропорційно кількостям цих фаз для сплаву K_2 : $\frac{Q_p}{Q_{ауст}} = \frac{bc}{ab}$;

кількість аустеніту $Q_{Ауст}$ за рівнянням: $Q_{Ауст} = \frac{bc}{ac} \cdot 100\%$;

а кількість рідкої фази Q_p за рівнянням: $Q_p = \frac{ab}{ac} \cdot 100\%$.

Отже

$$Q_{Ауст} = \frac{3,6 - 2,7}{3,6 - 1,4} \cdot 100\% = \frac{0,9}{2,2} \cdot 100\% = 41\%$$

$$Q_p = \frac{2,7 - 1,4}{3,6 - 1,4} \cdot 100\% = \frac{1,3}{2,2} \cdot 100\% = 59\%$$

Знайдемо концентрацію кожної фази:

аустеніт складається з 1,4 %C та 98,6 % Fe;

рідина складається 3,6 %C та 96,4 % Fe.

Користуючись правилом фаз (законом Гіббса), побудуємо криву охолодження для сплаву K_1 і криву нагрівання для сплаву K_2 , виходячи з діаграми стану $Fe-Fe_3C$ (див. рис. 28, а).

Наприклад, у процесі охолодження сплаву K_1 діаграми стану $Fe-Fe_3C$ у точці 1 на лінії ABC (див. рис. 28) із рідкої фази L виділяються кристали аустеніту, що фіксуємо, зносячи точку 1 на систему координат температура – час (див. рис. 28, б).

Так само переносимо точки 2, 3 і 4, які відповідають фазовим перетворенням, що відбуваються в сплаві K_1 у процесі його кристалізації.

Згідно з правилом фаз, у точці 4 процес кристалізації відбувається ізотермічно (за конкретної температури і впродовж певного часу), що фіксується горизонтальною лінією 4 – 4'. Криву нагрівання сплаву K_2 , яку побудовано за правилом фаз, наведено на рис. 1, в.

За діаграмою залізо-цементит можна побудувати криві охолодження. Для цього точки перетину вертикалі з лініями діаграми (рис. 28 б, в, 29 і 30), яка позначає сплав визначеної концентрації, переносять на систему координат температура-час і будують криву нагрівання або охолодження цього сплаву. Точки перетину з кривими лініями діаграми відповідають перегинам на кривих охолодження і нагрівання, а точки перетину з горизонтальними лініями відповідають площадкам на тих же кривих.

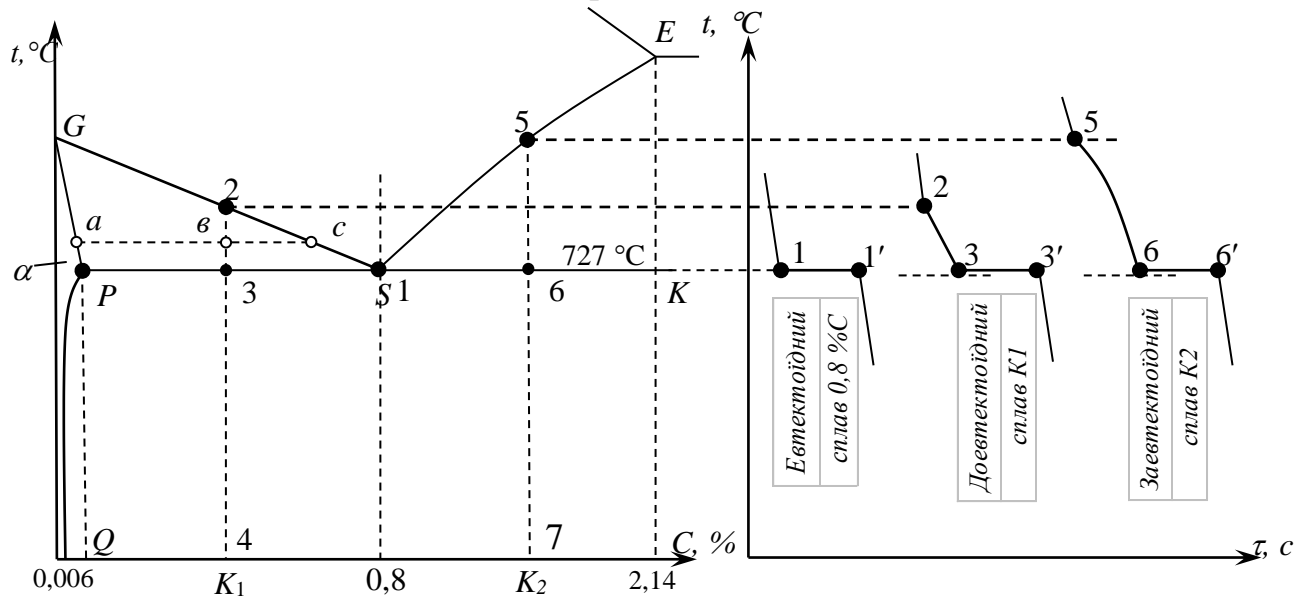


Рис. 29. Частина діаграми залізо-цементит. Вторинна кристалізація сталей.

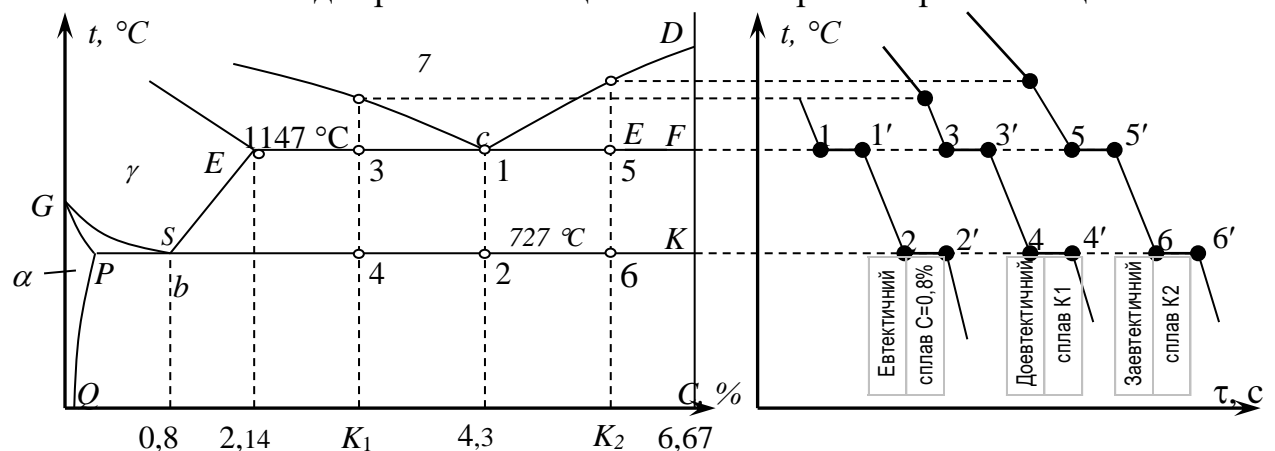


Рис. 30. Діаграма залізо-цементит. Вторинне перетворення у високо вуглецевих сплавах (чавунах).

Залізовуглецеві сплави з концентрацією вуглецю до 2,14 % називають **сталями**. За структурою у рівноважному сталі розрізняють:

Доевтектоїдні сталі містять до 0,8 % вуглецю і мають феритно-перлітну структуру у вигляді світлих зерен фериту і темних зерен перліту.

Евтектоїдна сталь містить 0,8 % вуглецю, її структура - зерна перліту, що складаються здебільшого із пластинок цементиту та фериту. Пластинки цементиту порівняно тонші й світліші.

Заевтектоїдні сталі містять від 0,8 до 2,14 % вуглецю. В структурі цих сталей є зерна перліту темного кольору і тонка світла мережа вторинного цементиту по границях зерен перліту.

Таблиця 8.

Фазові перетворення на лініях за діаграмою залізо-цементит

Позначення ліній	Фазові перетворення на лініях (при охолодженні)	Перелік фаз	Кількість фаз	Число ступенів волі
BC	Початок виділення аустеніту Fe_γ з рідини	Аустеніт + рідина	2	1
JE	Кінець виділення аустеніту Fe_γ з рідини	Аустеніт + рідина	2	1
AB	Початок виділення фериту Fe_δ з рідини	Ферит + рідина	2	1
AH	Кінець виділення фериту Fe_δ з рідини	Ферит + рідина	2	1
HN	Початок виділення аустеніту Fe_γ з фериту Fe_δ	Аустеніт + ферит	2	1
NJ	Кінець виділення аустеніту Fe_γ з фериту Fe_δ	Аустеніт + ферит	2	1
HJD	Перетворення рідини в аустеніт Fe_γ та ферит Fe_δ	Аустеніт + цементит + рідина	3	0
EC	Кінець виділення аустеніту Fe_γ з рідини і утворення ледебуриту	Аустеніт + цементит + рідина	3	0
CD	Початок виділення цементиту Fe_3C (первинного) з рідини	Рідина + цементит	2	1
CF	Кінець виділення цементиту Fe_3C (первинного) з рідини і утворення ледебуриту із рідини	Рідина + цементит + аустеніт	3	0
ECF	Утворення ледебуриту із рідини	Рідина + аустеніт + цементит	3	0
GS	Початок виділення фериту Fe_β з аустеніту Fe_γ	Аустеніт + ферит	2	1
GM	Кінець виділення фериту Fe_β з аустеніту Fe_γ	Аустеніт + ферит	2	1
MP	Кінець виділення фериту Fe_α з аустеніту Fe_γ	Аустеніт + ферит	2	1
PS	Кінець виділення фериту Fe_β з аустеніту Fe_γ і утворення перліту із аустеніту Fe_γ	Аустеніт + ферит + цементит	3	0
PSK	Утворення перліту із аустеніту Fe_γ	Аустеніт + ферит + цементит	3	0
SE	Початок виділення цементиту Fe_3C (вторинного) із аустеніту Fe_γ	Аустеніт + цементит	2	1
SK	Кінець виділення цементиту Fe_3C (вторинного) із аустеніту Fe_γ і утворення перліту із аустеніту Fe_γ	Аустеніт + цементит + ферит	3	0
PQ	Початок виділення цементиту Fe_3C (третинного) із фериту Fe_α	Ферит + цементит	2	1
MO	Лінія магнітного перетворення, яке відбувається при $768^\circ C$ для сплавів до $0,6\%C$, фериту $Fe_\beta \rightarrow$ фериту Fe_α	Аустеніт + ферит	2	1

Таблиця 9.

Характеристика структурних складових залізовуглецевих сплавів (сталей і чавунів).

Назва структури	Тип структури	Зміст вуглецю, %	Число фаз	Механічні властивості			Характеристика структури
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	НВ, кгс/мм ²	
Ферит	Твердий розчин вуглецю в α -залізі з обмеженою розчинністю	Від 0,006 (при 0°C) до 0,025 (при 727°C)	1	30	40	80...100	Пластична але не міцна
Ауспеніт	Твердий розчин вуглецю в γ -залізі з обмеженою розчинністю	Від 0,8 (при 727°C) до 2,14 (при 1147°C)	1	60	60	180...200	Дуже пластична
Цементит	Хімічне з'єднання заліза з вуглецем (Fe ₃ C)	6,67	1	200	0	800	Дуже тверда і крихка
Перліт	Механічна суміш фериту і цементиту	0,80	2	60	20	200	Середні міцність і пластичність
Ледебурит	Механічна суміш перліту і цементиту (до 727 °C), ауспеніт і цементит (від 727 до 1147 °C)	4,30	2	100	1...2	450...500	Тверда і крихка

Залізовуглецеві сплави з концентрацією вуглецю від 2,14 до 6,67 % називають **чавунами**.

Якщо весь вуглець у чавунах перебуває у вигляді хімічної сполуки Fe₃C, то такі чавуни називають **білими**. В структурі білих чавунів наявний ледебурит, що утворився на лінії **ECF** під час евтектичної реакції.

Чавуни, розташовані зліва від точки С, по закінченні первинної кристалізації мають структуру первинного ауспеніту та ледебуриду, а відповідно чавуни справа від точки С — структуру первинного цементиту і ледебуриду. Під час охолодження в інтервалі температур від 1147 °C (лінія **ECF**) до 727 °C (лінія **PSK**) гранична розчинність вуглецю в ауспеніті зменшується від 2,14 % до 0,8 % з утворенням вторинного цементиту.

За структурою білі чавуни поділяються на:

- **евтектичні** (4,3 % C) з структурою - ледебурит;
- **доевтектичні** (2,14...4,3 % C), структура : перліт + вторинний цементит + ледебурит;
- **заевтектичні** (4,3...6,67 % C), структура: первинний цементит + ледебурит.

Таблиця 10.

Фазові перетворення в точках за діаграмою залізо-цементит.

Позна-чення точок	Фазові перетворення в точках (при нагріванні та охолодженні)	Зміст вуглецю, %	Температура відповідно точкам, °C	Перелік фаз	Кількість фаз	Число ступенів волі	Зауваження
A	Температура плавлення і кристалізації чистого заліза	0	1539	Рідина + кристали заліза	2	-	Правило фаз Гіббса до одно-компонентних систем не застосовується
D	Температура плавлення і кристалізації цементиту	6,67	1600	Рідина + цементит (первинний)	2	-	
C	Плавлення і утворення ледебуриту	4,30	1147	Рідина + цементит + аустеніт	3	0	
E	Максимальне розчинення вуглецю в аустеніті	2,14	1147	Рідина + аустеніт + цементит	3	0	
S	Мінімальне розчинення вуглецю в аустеніті	0,80	727	Аустеніт + ферит + цементит	3	0	
G	Перетворення α -заліза в γ -залізо або γ -заліза в α -залізо	0	911	α -залізо + γ -залізо	2	-	
P	Максимальне розчинення вуглецю в α -залізі	0,025	727	Аустеніт + цементит (вторинний) + ферит	3	0	
Q	Мінімальне розчинення вуглецю в α -залізі	0,006	0	Ферит + цементит (третинний)	2	1	
K	Немає фазових перетворень	6,67	727	Цементит (первинний)	1		
F	Немає фазових перетворень	6,67	1147	Цементит (первинний)	1		
M	Магнітне перетворення	0	768	Чисте залізо	1		

Вуглецеві сталі, їх склад, структура і властивості залежно від вмісту постійних домішок Класифікація і маркування вуглецевих сталей і їх використання в машинобудуванні. Класифікація і маркування чавуну. Мікроструктури сірого, ковкого і високоміцного чавунів. Процес графітизації в чавунах.

1. Виробництво сталі.

Сталь, як і чавун, представляє собою сплав заліза з вуглецем та іншими домішками, але відрізняється від нього меншим їх вмістом. Тому отримання сталі з чавуну зводиться до оксидування домішок чавуну до необхідних меж киснем повітря або чистим киснем. Основними способами отримання сталі є конверторний, мартенівський та в електропечах. Виробництво сталі зростає у всьому світі. Зараз щороку виплавляють понад 830 млн. т. сталі. Україна посідає сьоме місце серед виробників сталі.

Конверторний спосіб виробництва сталі.

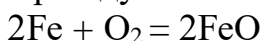
Для отримання сталі застосовують бесімерівський, томасівський та кисневий конвертори. В передових країнах зараз застосовують тільки кисневі конвертори, які почали впроваджуватись в 1954 році. В цілому в світі кисневі конвертори дають зараз близько 60% сталі.

Кисневий конвертор має сталевий корпус грушоподібної форми, обкладений зсередини вогнетривкою цеглою. Конвертор опирається на дві опори і може повертатись навколо горизонтальної осі для завантаження скрапу, наливання чавуну, насипання флюсу і залізної руди, виливання сталі та шлаку. Конвертор вміщує від 100 до 400 т рідкого чавуну.

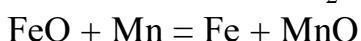
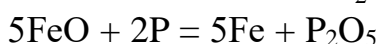
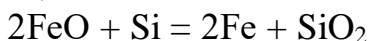
Матеріалами для киснево-конверторного процесу служать: рідкий переробний чавун (понад 70%), скрап (до 25%), залізна руда (до 10%), вапно CaO та плавиковий шпат для розрідження шлаку.

В конвертор заливають чавун з температурою 1300 - 1450°C, насипають скрап, руду, вапно та плавиковий шпат і через вертикальну фурму, яка охолоджується водою, вдувають кисень під тиском 0,9 – 1,4 МПа. Продування киснем триває 12 – 25 хв.

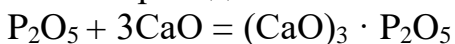
При вдуванні кисню відбувається оксидація заліза



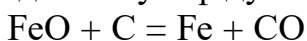
Оксид заліза розчиняється у металі і реагує з кремнієм, фосфором та марганцем:

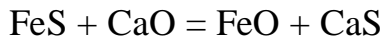


Оксиди SiO₂ та MnO впливають на поверхню металу і утворюють шлак. Фосфорний ангідрид реагує з оксидом кальцію, утворюючи фосфід кальцію, який також переходить в шлак.

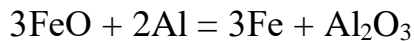
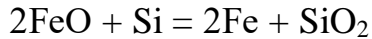
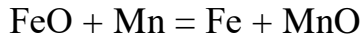


З підвищенням температури активізується оксидація вуглецю та переведення сульфїду заліза в сульфід кальцію, який переходить в шлак:





Бульбашки CO, піднімаючись вгору, добре перемішують вміст ванни, але внаслідок цього в майбутньому зливку залишаються безліч порожнин, заповнених CO. Така сталь називається киплячою. Ці порожнини можуть спричинити крихке руйнування при низьких температурах. Тому під час випуску сталі в ковші проводиться дезоксидація сталі спочатку марганцем, потім кремнієм та наприкінці - алюмінієм:



В результаті дезоксидації отримують спокійні та напівспокійні сталі.

Коли виплавляють леговані сталі, легуючі елементи вводять до їх складу у вигляді феросплавів або чистих металів під час виплавлення або в ківш.

Цей спосіб забезпечує високу продуктивність та не вимагає палива, але значна частина металу вигоряє і для процесу необхідно до 80% рідкого чавуну.

Виробництво сталі в електропечах

В електропечах виробляють високоякісні конструкційні, інструментальні та спеціальні сталі з мінімальним вмістом шкідливих домішок і неметалевих вкраплень. Електропечі поділяють на дугові та індукційні. Зараз в електропечах отримують до 35% світової сталі.

Електродугова піч складається із сталевого корпусу з вогнетривкою футерівкою. Корпус накритий склепінням з трьома отворами для графітизованих електродів. Джерелом тепла є електрична дуга, що горить між електродом і шихтою. Електроди автоматично опускаються, забезпечуючи необхідну дугу. Піч має отвір для виливання сталі та вікно для контролю за процесом і для завантаження флюсу, феросплавів та легуючих елементів. Для прискорення оксидації вуглецю, кремнію та марганцю розплавлений метал продувають киснем. Місткість дугових печей доходить до 400 т.

В ***індукційних електропечах*** змінний струм індуктора збуджує в металевій частині шихти потужні вихрові струми, які нагрівають і розплавляють шихту. В таких печах виплавляють дуже якісні жаростійкі, жароміцні та інші сталі.

Індукційна тигльова піч складається з тигля, навколо якого намотаний індуктор з мідної труби, охолоджуваної водою. Тигель виготовляється з вогнетривких порошоків, скріплених зв'язкою. Тигель завантажується шихтою і закривається кришкою. Рідкий метал виливається у розливний пристрій при нахиланні печі.

Позадоменне рафінування сталі

Останнім часом постійно зростають вимоги до чистоти сталі щодо оксидів, сульфідів і розчинених газів. Очищення сталі частіше всього проводять після виливання з доменної печі в ківш. Основними способами такого

очищення є обробка рідкої сталі в ковші синтетичним шлаком, вакуумування сталі та продування її інертним газом.

Обробка сталі синтетичним шлаком полягає в тому, що спочатку на дно ковша засипають синтетичний шлак, а потім заливають розплавлену сталь. Цей шлак складається із 55% CaO, 40% Al₂O₃, решта - SiO₂, MgO, FeO і готується в електропечі. Шлак добре перемішується з металом, зменшує вміст сірки і виносить на поверхню неметалеві домішки.

Вакуумна дегазація проводиться в спеціальній камері, куди ставлять ківш з металом. В камері знижується тиск і на поверхню металу бурхливо виходить азот, водень і оксид вуглецю, захоплюючи з собою неметалеві домішки.

Продування рідкої сталі інертним газом (частіше всього аргоном) через пористі вогнетривкі блоки в дні ковша сприяє виходу на поверхню металу водню та азоту та винесенню неметалевих вкраплень.

Розливання сталі

Виплавлена сталь з печі або конвертора виливається в ківш і недовго відстоюється для вирівнювання хімічного складу, дегазації і вилучення неметалевих вкраплень. Ківш має сталевий корпус, футерований шамотом або магнезитом. В дні є отвір для виливання сталі. Отвір закритий металевим стопором, захищеним вогнетривками. Ківш містить від 5 до 400 т. сталі і транспортується мостовим краном. З ковша сталь виливають в машини безперервного литва або в спеціальні металеві форми – виливниці. Після кристалізації отримують зливки, які переважно подаються на прокатування.

Виливниця частіше всього виготовляється з чавуну і має квадратну, прямокутну або круглу форму. Маса злиwkів від 1 до 12т., інколи до 300т. Метал у виливниці заливають зверху або сифонним способом. При **розливанні зверху** сталь розбризкується, бризки прилипають до поверхні виливниці, покриваються оксидною плівкою і не переходять у зливки. Перед прокатуванням їх потрібно вирізувати.

При **сифонному розливанні** сталь з центрального ливника по каналах надходить одночасно у всі виливниці. Поверхня злиwkів якісніша, але витрачається метал на ливникову систему. Так отримують дрібні та середні зливки.

Налита у виливницю сталь охолоджується нерівномірно. Кристалізація починається біля стінок та дна виливниці. Так як потік теплоти направлений перпендикулярно до стінок виливниці, то в цих напрямках утворюються стовпчасті кристали. В процесі охолодження зливка зменшується його об'єм і утворюється **усадкова порожнина** у верхній частині зливка.

Безперервне розливання полягає в тому, що сталь із ковша виливають у металевий кристалізатор, який охолоджується водою. Розжарений зливки

валками протягується вниз, додатково охолоджується водою. Тому кристалізація відбувається швидко. В результаті структура зливка щільна, дрібнозерниста і хімічно однорідна. На виході з машини зливок розрізується на частини необхідної довжини. Поперечний переріз кристалізатора визначається конфігурацією майбутнього виробу. Зливки мають якісну поверхню, відсутня усадкова порожнина, нема потреби у великій кількості виливниць.

В Японії, Італії, Південній Кореї та ФРН понад 95% сталі розливають на таких машинах. Дуже відстають в цьому КНР, Росія, Індія та Україна.

Вуглецеві сталі.

Вуглецеві сталі – це багатокомпонентні сплави заліза з вуглецем, марганцем, кремнієм, фосфором, сіркою та іншими компонентами.

Вплив постійних домішок на властивості сталі

Вуглець у сталях перебуває в складі фериту і цементиту. Ферит має невисоку міцність, малу твердість і добру пластичність, але зі збільшенням кількості вуглецю частка фериту у сталі поступово зменшується, а частка високотвердого і малопластичного цементиту зростає. Така зміна у співвідношенні фаз фериту й цементиту збільшує міцність та твердість і зменшує її пластичність та ударну в'язкість. Міцність зростає доти, поки частка вуглецю не досягне 0,8...0,9 %. Подальше збільшення вуглецю спричинює зменшення міцності, що призводить до руйнування під час навантаження крихкої сітки вторинного цементиту навколо перлітних зерен.

Поруч з механічними властивостями змінюються також і властивості технологічні. Зокрема з ростом кількості вуглецю в сталі її зварюваність і оброблюваність різанням погіршуються. Сталі добре зварюються, якщо кількість вуглецю в них не перевищує 0,25 %.

Марганець, як відомо, використовують в металургії з метою дезоксидації та десульфідизації рідкого металу. При цьому частина марганцю у вигляді MnO і MnS потрапляє в шлак, який згодом зливають, а інша — залишається в металі у складі фериту і цементиту. Розчинений у фериті марганець спотворює кристалічну решітку, внаслідок чого помітно підвищується міцність сталі, хоч пластичність змінюється мало.

Кремній застосовують для дезоксидації. Він утворює з феритом твердий розчин, спотворена гратка якого збільшує міцність і знижує пластичність сталі.

Фосфор розчиняється у фериті і хоч підвищує міцність, проте зменшує пластичність та ударну в'язкість сталі. Спад ударної в'язкості стає причиною ***холодноламкості***, тобто схильності сталі до крихкого руйнування при низьких температурах.

Сірка не розчиняється в залізі, входить до складу хімічної сполуки FeS.

Низька температура плавлення сполуки спричинює **червоноламкість** — схильність сталі до крихкого руйнування під час гарячої обробки тиском. Тому сталь з підвищеною концентрацією сірки не рекомендують для гарячої обробки тиском. Сірка, як і фосфор, є шкідливою домішкою.

Негативний вплив сірки істотно пом'якшує марганець, оскільки він утворює хімічну сполуку MnS з температурою плавлення 1620 °С. В межах температур гарячої обробки тиском (800...1200 °С) MnS пластичний і не сприяє крихкому руйнуванню, але сульфід марганцю при нормальній температурі можуть стати центрами зародження тріщин під повторно-змінними навантаженнями.

Кисень, азот і водень у сталях можуть перебувати у складі оксидів і нітридів, у твердому розчині α -заліза та у газоподібному стані в мікропорожнинах. Неметалеві вкраплення знижують ударну в'язкість і втомну міцність.

Розчинність кисню, азоту та водню в α -залізі незначна й істотно зменшується зі зниженням температури. Це призводить до виділення в пограничних зонах оксидів чи нітридів. Що стосується водню, то він не утворює із залізом хімічних сполук і може протягом тривалого часу поступово виділятися зі сталі. Як наслідок — окремі властивості сталі поліпшуються. Якщо водню багато, то він утворює в мікропорожнинах високий тиск, що призводить до виникнення внутрішніх тріщин — **флокенів**. Флокени трапляються в усіх сталях, однак їх найбільше в сталях, що містять хром. Що більша міцність сталі, то флокени небезпечніші. Шкідливий вплив газів можна зменшити, дегазуючи рідкий метал перед розливанням.

Класифікація вуглецевих сталей

Вуглецеві сталі класифікують за структурою, способом виробництва, ступенем дезоксидації, якістю та призначенням.

За **структурою** вуглецеві сталі поділяють на доевтектоїдні, евтектоїдні, та заевтектоїдні.

За **способом виробництва** розрізняють сталі, виплавлені в кисневих конвертерах, в електропечах і в мартенівських печах.

Залежно від **ступеня дезоксидації** сталі поділяють на спокійні, напівспокійні й киплячі. Всі вони за однакової масової частки вуглецю мало відрізняються статичною міцністю, проте мають різні пластичні властивості, зумовлені неоднаковою масовою часткою кремнію, яка найбільша в спокійній сталі (0,15...0,30 %) і найменша в киплячій (до 0,05 %). Через найменшу кількість кремнію, розчиненого у фериті, кипляча сталь найпластичніша.

За **якістю** розрізняють сталі звичайної якості, якісні та високоякісні. Критерієм якості сталей є масові частки шкідливих домішок — фосфору і сірки.

Відповідно до **призначення** сталі поділяють на конструкційні з масовою часткою вуглецю до 0,65 % та інструментальні з масовою часткою вуглецю в межах від 0,65 до 1,35 %. Конструкційні сталі використовують для виготовлення деталей машин, металевих конструкцій та будівельних споруд. З інструментальних сталей виробляють різальні, вимірювальні інструменти та штампи.

Сталі вуглецеві конструкційні звичайної якості

Вуглецеві сталі звичайної якості є найдешевшими серед сталей. Вони мають підвищену масову кількість фосфору (до 0,07 %) і сірки (до 0,06 %). **Марки** цих сталей позначають літерами и цифрами. Літери **Ст** означають „сталь“, цифри - умовний номер марки (від 0 до 6) залежно від хімічного складу, літери **кп, пс, сп** - ступінь дезоксидації (кп - кипляча, пс – напівспокійна, сп - спокійна). Хімічний склад можна визначити з довідників.

При підвищеному вмісті в сталі марганцю в марці після цифри записують літеру Г, наприклад СтЗГсп.

Якщо для виплавлення сталей звичайної якості використовують значну кількість скрапу, то в їхньому складі допускається масова частка міді до 0,40%, хрому та нікелю – до 0,35%.

Сталі звичайної якості постачають замовникам у вигляді листів та прокатаних напівфабрикатів стандартного профілю. Ці профілі й листи попередньо розрізують до заданих розмірів, після чого з них виготовляють різні металоконструкції або прості заготовки, призначені переважно для малонавантажених деталей. Заготовки складнішої форми отримують куванням або штампуванням.

Застосовуючи термічну обробку (в тому числі й зміцнювальну), можна змінювати в певних межах структуру та властивості сталей звичайної якості.

Сталі конструкційні вуглецеві якісні

Сталі конструкційні вуглецеві якісні відрізняються від сталей звичайної якості меншою масовою часткою фосфору (не більше ніж 0,035 %), сірки (не більше ніж 0,040 %), а також меншими частками неметалевих вкраплень і газів. Металургійний завод, що виплавляє ці сталі, гарантує не лише хімічний склад, але й механічні властивості.

Марки конструкційних вуглецевих якісних сталей позначають двозначними числами (що означають середню масову частку вуглецю у сотих частках відсотка) і літерами **кп** (кипляча сталь) або **пс** (напівспокійна). Спокійні сталі маркують без індексу **сп**. Наприклад, сталь 45 — спокійна; вона має в середньому 0,45 % вуглецю.

Зі збільшенням у сталі кількості вуглецю від 0,08 до 0,60 % її міцність σ_v

у нормалізованому стані зростає від 320 до 680 МПа, а відносне видовження δ зменшується від 33 до 12 %. Із маломіцних сталей марок 05, 08, 10 завдяки високій пластичності виготовляють вироби холодним штампуванням, Зі сталей марок 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 виготовляють різноманітні деталі (в тому числі і відповідальні), що вимагають нормалізації або поверхневого гартування.

Недоліком вуглецевих сталей є мала прогартовуваність.

Різновидністю конструкційних вуглецевих сталей є *автоматні сталі*, які використовуються для виготовлення малонавантажених деталей на верстатах-автоматах. Ці сталі мають підвищену оброблюваність, для чого часто підвищують вміст сірки (до 0,3%), фосфору (до 0,15%) і марганцю (0,70 – 1,55%). Такі сталі маркують літерою А та цифрами, які показують середній вміст вуглецю (А12, А20). Якщо сталь призначена для виготовлення виливків, то в кінці її марки записують літеру Л (25Л, 45Л), а у марках якісних сталей, призначених для виготовлення котлів, що працюють під тиском, після двохзначного числа пишуть літеру К (12К, 22К).

Сталі вуглецеві інструментальні

Сталі інструментальні нелеговані (вуглецеві) бувають якісні і високоякісні. Масова частка шкідливих домішок у якісних сталях не більше ніж 0,030 % фосфору й не більше ніж 0,028% сірки, а у високоякісних сталях - не більше ніж 0,025 % фосфору й не більше ніж 0,018% сірки.

Марки інструментальних вуглецевих сталей позначають літерою У (вуглецева) і числами, що означають масову частку вуглецю у десятих долях відсотка (У7, У12). В сталі У7 маємо в середньому 0,7 % вуглецю, а в сталі У12 — 1,2 %. За підвищеної кількості марганцю у сталі після числа дописують літеру Г (У8Г). Високоякісні сталі позначають літерою А (У8А, У12А).

Інструменти для різання металів працюють в умовах високого тиску, температури й тертя. Щоб ефективно їм протистояти, ці матеріали повинні мати високу твердість, зносостійкість, теплостійкість і міцність.

Твердість різальної частини інструмента має значно перевищувати твердість оброблюваного матеріалу.

Зносостійкість — це здатність інструмента якомога довше протистояти поступовому його руйнуванню з боку матеріалу заготовки. Внаслідок такого руйнування різальний інструмент затуплюється. Що твердіший матеріал інструмента, то вищою буде його зносостійкість.

Теплостійкістю називають температуру, при нагріванні до якої твердість інструмента починає стрімко знижуватись внаслідок структурних змін.

Міцність різального інструмента повинна бути достатньою, щоб

сприймати великі сили різання.

Із сталей У7, У7А виготовляють інструменти для обробки дерева (сокири, стамески, долота) та ударні інструменти (пуансони, молотки, зубила). Для виготовлення деревообробних інструментів (фрез, пил, свердл) використовують сталі У8, У8А, У8Г, У8ГА, У9, У9А. Із сталей У10, У10А, У12, У12А виготовляють металообробний інструмент, що працює при невисоких температурах (мітчики, плашки, штампи, вимірювальні інструменти). Із сталей У12, У12А, У13, У13А виготовляють напилки, шабери.

Білі чавуни

Білими називаються чавуни, в яких весь вуглець перебуває у хімічній сполуці Fe_3C . Їх злами мають білий колір.

При охолодженні чавуну на лінії ліквідус із рідкого розчину виділяються кристали аустеніту й первинного цементиту. На ділянці ***ECF*** лінії солідус відбувається евтектична реакція з утворенням ледебуриту. Між лініями ***ECF*** і ***PSK*** із аустеніту виділяється вторинний цементит, а на лінії ***PSK*** аустеніт розпадається на дисперсну двофазову структуру — перліт. Отже, у структурі всіх білих чавунів наявна дуже тверда й крихка евтектика — ледебурит. Білі чавуни застосовують лише для виготовлення зносостійких деталей машин, при виготовленні яких не потрібна механічна обробка.

Графітизація чавунів

На відміну від білих, сірі, ковкі й високоміцні чавуни мають вкраплення графіту з металевій основі. Графіт виділяється з рідкого і твердого розчинів, а також з цементиту. Залежно від умов кристалізації у чавунах формується графіт або цементит. Утворення графіту потребує меншої швидкості охолодження. Враховуючі ці та інші особливості, можна керувати процесом структуроутворення в чавунах. Перетворення цементиту в графіт відбувається також під час тривалого нагрівання.

Вплив домішок і швидкості охолодження на структуру та властивості чавунів

Постійні домішки, (кремній, марганець, сірка та фосфор), а також швидкість охолодження істотно впливають на процес графітизації.

Кремній найбільше посилює графітизацію чавуну і під час первинної кристалізації, і під час розкладання цементиту. Підвищуючи вміст кремнію, можна збільшувати кількість графіту та зменшувати кількість цементиту, наближаючись до створення чавуну з феритною металевою основою. Зменшуючи частку кремнію, можна сформувати структуру чавуну з перлітною основою.

Марганець протидіє графітизації, сприяючи утворенню цементиту.

Водночас він дещо поліпшує механічні властивості відливоків.

Сірка — шкідлива домішка, що погіршує механічні й ливарні властивості чавуну. Вона сильніше від марганцю протидіє графітизації і сприяє виділенню цементиту. Крім цього, сірка знижує рідкоплинність чавуну, збільшує усадку, підвищує схильність до утворення газових бульбашок і тріщин. З цієї причини вміст сірки в чавунах дуже обмежують.

Фосфор практично не впливає на графітизацію. Його використовують у чавунах для підвищення рідкоплинності, твердості та зносостійкості. Чавуни з високою концентрацією фосфору широко використовують для художнього лиття.

З-поміж *легувальних* елементів найпомітніший вплив на графітизацію мають мідь, нікель і хром. **Мідь** і **нікель** інтенсифікують графітизацію, а **хром** її послаблює.

Дрібні тверді частинки, зрівноважені в рідкому розчині, сприяють виділенню графіту, будучи центрами графітизації.

Збільшення швидкості охолодження гальмує виділення графіту і сприяє утворенню цементиту.

Крім швидкості охолодження, сильно впливають на графітизацію чавуну вуглець і кремній. Зі збільшенням їх сумарної частки графітизація посилюється.

Таким чином, регулюючи сумарну частку складових металу та швидкість охолодження, можна досягти бажаної структури металевої основи сірого чавуну.

Сірі чавуни (з пластинчастим графітом)

В структурі цих чавунів більша частка вуглецю перебуває у вигляді графіту пластинчастої форми в площині шліфа. Решта вуглецю разом із залізом утворює структуру металевої основи (феритну, феритно-перлітну або перлітну).

На формування структури чавуну з пластинчастим графітом впливають такі фактори, як хімічний склад, швидкість охолодження, а також наявність у рідкому розчині дрібних твердих частинок. Вуглець (2,9...3,7 %) і кремній (1,2...2,6 %) сприяють виділенню графіту, а марганець (0,5...1,1 %) і сірка (0,12...0,15 %) — утворенню цементиту. Змінюючи сумарну масову частку вуглецю та кремнію з одного боку і зменшуючи сумарну масову частку марганцю та сірки з другого, можна регулювати співвідношення між вільним та хімічно зв'язаним вуглецем.

Чавуни з пластинчастим графітом мають добрі ливарні властивості, легко обробляються різанням, здатні гасити вібрації, що виникають в конструкціях, є найдешевшими і найпоширенішими серед ливарних сплавів. Водночас чавуни з пластинчастим графітом відзначаються невисокою міцністю ($\sigma_s = 100...350$ МПа) і пластичністю через особливості форми графітових вкраплень з

гострими краями. Такі вкраплення можна розглядати як сильні внутрішні концентратори напружень або навіть як мікротріщини.

Умовне позначення марки має літери **СЧ** — сірий чавун й цифри — значення мінімальної межі міцності матеріалу на розрив σ_b в 10^{-1} МПа.

При виборі марки чавуну для конкретних умов роботи беруть до уваги як механічні так і технологічні властивості. Феритні сірі чавуни СЧ10, СЧ15, СЧ18 призначені для мало- і середньо-навантажених деталей: кришок, фланців, маховиків, корпусів редукторів і підшипників, супортів, гальмівних барабанів, дисків зчеплення тощо. Ферито-перлітні сірі чавуни СЧ20, СЧ21, СЧ25 використовують для деталей, які працюють при підвищених статичних і динамічних навантаженнях: блоків циліндрів, картерів двигунів, поршнів, станин верстатів, зубчастих коліс тощо. Перлітні сірі чавуни СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45 мають найвищі механічні властивості (завдяки дрібним відокремленим графітним вкрапленням) і використовують для деталей, які працюють при великих навантаженнях або у важких умовах стирання: зубчасті колеса, гільзи блоків циліндрів, шпинделі, розподільчі вали і т.п. Ці чавуни мають найвищу герметичність, тому з них виготовляють також корпуси насосів і компресорів, арматуру гальмівної пневматики та гідроприводів. Для деталей, які працюють при підвищених температурах, сірі чавуни *легуєть*. Жаростійкості сприяють домішки хрому та алюмінію, жароміцності — хрому, нікелю й молібдену. З метою підвищення зносостійкості гільз циліндрів, розподільчих валів та інших деталей їх робочі поверхні піддають зміцнювальній термічній обробці, а також насичують азотом.

Ковкі чавуни

Ковкими називають чавуни з пластівчастою формою графіту, отримані внаслідок спеціального довготривалого відпалу відливок з білого чавуну. Щоб отримати ковкий чавун, необхідно виготовити відливки білого чавуну, потім їх відпалити з метою графітизації. Утворений внаслідок відпалу графіт має компактну майже рівноосьову, але не сферичну форму. Назва ***ковкий чавун*** умовна, тому що відливки завжди виготовляють литтям, а не куванням. Графіт пластівчастої форми є слабшим внутрішнім концентратором напружень порівняно з графітом пластинчастим, що міститься в сірому чавуні, внаслідок чого ковкі чавуни міцніші і пластичніші, ніж сірі. Залежно від режиму відпалу металева основа ковкого чавуну може бути феритною, перлітною і рідше — феритно-перлітною.

Щоб не допустити навіть часткової графітизації білого чавуну під час його охолодження в ливарній формі, треба вибирати товщину стінок відливка в межах від 3 до 50 мм, а хімічний склад рідкого розчину підтримувати в доволі вузьких межах: 2,4...2,9 % С; 1,0...1,6 % Si; 0,3...1,0 % Mn; до 0,2 % Р і до 0,18 %

S. Тобто чавун має порівняно низький вміст вуглецю, кремнію та марганцю. Після відпалу на графітизацію чавуни з такою низькою часткою вуглецю матимуть у структурі небагато компактних графітових вкраплень, що сприятиме поліпшенню їхніх механічних властивостей. Тому, що вища міцність ковкого чавуну потрібна, то менше вуглецю повинно бути у вихідному білому чавуні. Відпал білого чавуну виконують в одну або дві стадії залежно від структури, яку необхідно сформувати, але графітизація доволі тривала та енергомістка, що стримує широке застосування ковких чавунів у машинобудуванні.

Залежно від механічних властивостей ковкі чавуни відповідно маркують. Марки ковких чавунів позначають літерами **КЧ** і числами, перше з яких відповідає межі міцності на розрив σ_b в 10^{-1} МПа, а друге — відносному видовженню — δ у %. Феритні чавуни (КЧ 30-6...КЧ 37-2) характеризуються високою пластичністю ($\delta = 6...12$ %), а перлітні (КЧ 45-7...КЧ 80-1,5) — підвищеною міцністю й твердістю. З ковких чавунів виготовляють відливки, що працюють під ударними або знакозмінними циклічними навантаженнями (корпуси редукторів, корпуси задніх мостів вантажних автомобілів, вилки карданних валів, муфти тощо).

Високоміцні чавуни (з кулястим графітом)

Чавун з кулястим графітом має в металевій основі графіт кулястої форми. Структура металевої основи — ферит, ферито-перліт або перліт. Чавун з феритною основою найменш міцний, але високопластичний, а чавун з перлітною основою — міцний, але малопластичний.

Щоб отримати високоміцний чавун, перегрівають рідкий метал та додають до нього модифікатори (магній, цезій, кальцій), які сприяють сфероїзації графіту під час кристалізації. Кулястий графіт порівняно з пластинчастим є слабшим концентратором напружень. Високоміцні чавуни мають добрі ливарні показники, вони перевершують чавуни з пластинчастим графітом за механічними властивостями ($\sigma_b = 350...1000$ МПа, $\delta = 2...22$ %) і успішно конкурують з ковкими чавунами та сталями. У промислово розвинутих країнах частка чавунів з кулястим графітом серед ливарних сплавів становить 20...30 %. Завдяки високій міцності й пластичності високоміцних чавунів з них виготовляють відповідальні деталі: колінчасті та розподільчі вали, поршні та поршневі кільця, шестерні та зірчатки, валки прокатувальних станів, шаботи ковальських молотів, корпуси парових турбін, супорти, різцетримачі і планшайби металорізальних верстатів. Марки чавунів з кулястим графітом позначають літерами **ВЧ** і числами, перше з яких відповідає межі міцності на розрив σ_b в 10^{-1} МПа, а друге — відносному видовженню — δ у %. (ВЧ 35-22, ВЧ 60-3, ВЧ 100-2).

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуменюк І., Гуменюк О., Паржницький В. Види з'єднань : навчальний посібник. Київ : Грамота, 2021. 272 с.
2. Власенко, А. Матеріалознавство та технологія металів : підручник. Київ : Літера ЛТД, 2019. 224 с.
3. Василенко І. І., Василенко Ю. І., Широков В. В. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Львів : Магнолія-2006, 2018. 242 с.
4. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. Київ : НУВО «Енергокомплекс», 1996. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60106.
5. ДСТУ 2815-94. Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. Київ : Держ. Стандарт України, 1996. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60356.
6. ДСТУ 2725-94. Матеріали магнітні. Терміни та визначення. Чинний від 1995-07-01. Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 1996. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93725
7. Биковський О. Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій : підручник. Київ : Основа, 2021, 400 с.
8. Кольорові метали та сплави : навчальний посібник / за ред. З. Дурягіної. Львів : Львівська Політехніка, 2017. Ч. 1: Мідь та мідні сплави. 122 с.
9. Технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник / С. В. Марченко та ін. Суми : СумДУ, 2016. 146 с.
10. Матеріалознавство і слюсарна справа : навчальний посібник / П. П. Федірко та ін. ; за ред. П. П. Федірка. 2-ге вид., випр. і допов. Кам'янець-Подільський : ПП Медобори-2006, 2012. 384 с.
11. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : підручник / А. С. Опальчук та ін. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2015. 428 с.
12. Говорун Т. П., Гапонова О. П., Марченко С. В. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях) : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2020. 163 с.
13. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум : посібник / А. С. Опальчук та ін. Київ : НУБіП, 2015. 428 с.
14. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник. Київ : Літера ЛТД, 2019. 224 с.
15. Матеріалознавство. Сталь: класифікація, виробництво, споживання, маркування : навчальний посібник / за ред. Я. А. Криля. Львів : Новий Світ-2000, 2020. 267 с.
16. Матеріалознавство. Тлумачний словник. в 2-х т. Т. 1. за ред. Я. А. Криля. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 476 с.
17. Матеріалознавство. Тлумачний словник. в 2-х т. Т. 2. / за ред. Я. А. Криля. Львів : Новий Світ – 2000, 2020. 432 с.

18. Муляр Ю. І., Дерібо О. В. Програмування токарної обробки на верстатах з ЧПК. Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2004. 91 с.
19. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства : навчальний посібник / за ред. А. С. Опальчука. Київ : Вища освіта, 2006. 287 с.
20. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум : посібник / А. С. Опальчук та ін. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2015. 426 с.
21. Основи матеріалознавства : навчальний посібник / С. М. Високо́с та ін. ; упоряд. Т. Б. Боброва. Київ : Ресурсний центр ГУРТ, 2016. 101 с.
22. Онофрейчук Н. В. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням : підручник. Львів : Світ, 2019. 352 с.
23. Попов А. Ф., Пахар Т. В., Паржницький О. В., Шулепіна Г. Ю. Основи слюсарної справи : навчальний посібник. Чернівці : Букрек, 2020. 224 с.
24. Сушко О. В., Посвятенко Е. К., Кюрчев С. В., Лодяков С. І. Прикладне матеріалознавство : підручник. Мелітополь : ТПЦ "Forward press", 2019. 352 с.
25. Технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник / за ред. М. А. Сологуба. Київ : Вища школа, 1993. 300 с.
26. Пахаренко В. Л., Марчук М. М., Пахаренко О. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням). Рівне, 2018. 252 с.
27. Гуменюк І. В., Гуменюк О. В., Паржницький В. В. Технологія механоскладальних робіт : підручник. Київ : Грамота, 2020. 256 с.
28. Токарна справа : навчальний посібник. У 2-х ч. Ч. 1. Чернівці : Букрек, 2020. 232 с.
29. Токарна справа : навчальний посібник. У 2-х ч. Ч. 2. Чернівці : Букрек, 2021. 176 с.
30. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство. Одеса : Гельветика, 2020. 612 с.
31. Котречко О. О., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Практикум з матеріалознавства. Одеса : Гельветика, 2020. 500 с.
32. Матеріалознавство та матеріали у харчовій промисловості : підручник / В. А. Косенко та ін. Київ : Університет "Україна", 2017. 297 с.
33. Косенко В. А., Кущевська Н. Ф., Добровольський О. Г., Малишев В. В. Матеріалознавство та матеріали у автомобільному транспорті. Київ : Університет «Україна», 2015. 313 с.
34. Матеріалознавство. Сталь: класифікація, виробництво, споживання, маркування : навчальний посібник / за ред. Я. А. Криля. Львів : Новий Світ-2000, 2020. 267 с.
35. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Наноматеріалознавство. Стереотипне видання. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 550 с.
36. Основи теорії різання матеріалів : підручник / М. П. Мазур та ін. ; за ред. М. П. Мазура. 2-е вид. перероб. і доп. Львів : Новий світ-2000, 2011. 422 с.
37. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Львів : Магнолія-2006, 2018.

242 с.

38. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2006. 528 с.
39. Базь О.С., Захаренко Г.С. Токарна справа : навчальний посібник. Чернівці : Букрек, 2020. 232 с. URL: <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidrucnyku-posibnyku-profosvita/Navch-posibnyk-tokarna-sprava-chastyna1-Vaz.pdf>.
40. Попов А. Ф., Пахар Т. В., Паржницький О. В., Шулепіна Г. Ю. Основи слюсарної справи : навчальний посібник. Чернівці : Букрек, 2020. 224 с. URL: <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidrucnyku-posibnyku-profosvita/slusarna-sprava-Popov.pdf>.
41. Технологія конструкційних матеріалів / М. А. Сологуб та ін. ; за ред. М. А. Сологуба. Київ : Вища школа, 2002. 374 с.
42. Сологуб М. А. Матеріалознавство та технологія матеріалів : підручник. Київ : НУХТ, 2015. 399 с.
43. Пахаренко В. Л., Марчук М. М., Пахаренко О. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням). Рівне, 2018. 252 с.
44. Сагач М.Ф. Магнітні матеріали : навчальний посібник. Київ : НАУ, 2001. 126 с.
45. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / А. С. Головченкота ін. Дніпро : НТУ «ДП», 2012. 184 с.

11.2. Допоміжна література

1. Carter C. B., Norton M. G. Ceramic Materials. Science and Engineering = Керамічні матеріали. Наука та техніка. Massachusetts : Springer, 2013. 775 с.
2. Kar Kamal K. Composite Materials. Processing, Applications, Characterizations = Композиційні матеріали. Обробка, заявки, характеристики Massachusetts : Springer, 2017. 694 с.
3. Complex heat exchange in friction steam of brakes = Складний теплообмін у фрикційній парі гальм / I. Kernytskyu et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 19. P. 7412. URL: <https://doi.org/10.3390/en15197412>.
4. Kulkarni Sulabha K. Nanotechnology: Principles and Practices = Нанотехнології: принципи та практики. Massachusetts : Springer, 2015. 418 с.
5. Schijve Jaap. Fatigue of Structures and Materials = Утома конструкцій та матеріалів Massachusetts : Springer, 2009. 627 с.
6. Заміна операції шліфування на поверхневу пластичну деформацію / В. О. Артюх та ін. *Modern engineering and innovative technologies*. 2018. Issue №5. Part 2. October 2018. P. 62-66.
7. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство : підручник. Херсон : Олді-плюс, 2012. 612 с.
8. Будівельне матеріалознавство : підручник / П. В. Кривенко та ін. Київ : Ліра К, 2012. 624 с.
9. Василюк Г. Т., Мельничук П. П., Лоев В. Ю. Конструювання, розрахунок та специфікація токарних верстатів з ЧПК. Житомир : ЖІТІ, 2001. 256 с.

10. Криль Я. А., Флюнт О. Р., Криль Г. В. Матеріалознавство. Тлумачний словник. Т.2 : Н-Я. Львів : Новий Світ-2000, 2012. 476 с.
11. Марченко С. В., Будник А. Ф., Юскаєв В. Б. Основи виробництва матеріалів та формоутворення об'єктів технологій : навчальний посібник. Суми : СумДУ, 2013. 242 с.
12. Лапенко Г. О., Падалка В. В., Горбенко О. В., Ляшенко С. В. Матеріалознавство : навчальний посібник. Полтава : ПДАА, 2011. 177 с.
13. Матеріалознавство і слюсарна справа : навчальний посібник / П. П. Федірко та ін. ; за ред. П. П. Федірка. Кам'янець-Подільський : ПП Медобори-2006, 2012. 384 с.
14. Степанчук А. Матеріалознавство тугоплавких металів та сполук : навчальний посібник. Київ : Центр навчальної літератури , 2020. 336 с.
15. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. Металознавство : підручник. Київ : Політехніка, 2010. 384 с.
16. Основи матеріалознавства : навчальний посібник / С. М. Високос та ін. ; упоряд. Т. Б. Боброва. Київ : Ресурсний центр ГУРТ, 2016. 101 с.
17. Пахаренко В. О., Пахаренко В. В., Яковлева Р. А. Пластмаси в будівництві : підручник. Київ : Ліра К, 2012. 352 с.
18. Полянський П. М., Іванов Г. О. Вплив конструктивно-технологічних факторів на границю витривалості деталей машин. *Розвиток українського сіла – основа аграрної реформи в Україні* : причорноморська регіональна науково-практична конференція професорсько-викладацького складу (м. Миколаїв, 21-23 квітня 2021 р.) / Міністерство освіти і науки України ; Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв : МНАУ, 2021. С. 26-32.
19. Полянський П. М., Іванов Г. О., Нагорний О. О. Залежність механічних властивостей і структури цементованих деталей від вмісту вуглецю. *Крамаровські читання* : збірник тез доповідей VI міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) (м. Київ, 21-22 лютого 2019 р.). Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 201-203.
20. Полянський П.М. Проектування поршневих кілець з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів. *Техніка і технології АПК*. 2015. № 10 (73). С. 29-30.
21. Прикладне матеріалознавство : підручник / О. В. Сушко та ін. Мелітополь : ТПЦ "Forward press", 2019. 352 с.
22. Сушко О. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник. Мелітополь : ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010. 232 с.
23. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів : навчальний посібник / Г. П. Кислая та ін. Київ : Центр навчальної літератури, 2018. 320 с.
24. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org>

11.3. Інформаційні ресурси

Moodle МНАУ. URL: <https://moodle.mnau.edu.ua/course/view.php?id=664>

Навчально-методичне видання

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Модуль №1 «Матеріалознавство»

конспект лекцій

**Укладачі: Полянський Павло Миколайович,
Іванов Геннадій Олександрович,
Доценко Наталія Андріївна**

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 5.
Тираж 50. Зам. № ____.

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету.
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.