**Чавуни** - це залізовуглецеві сплави, масова частка вуглецю в яких перебуває в межах від 2,14 до 6,67 %. Крім заліза та вуглецю, в чавунах промислового виробництва є постійні домішки кремнію, марганцю, фосфору та сірки в кількостях більших, ніж у сталях. Чавуни характеризуються добрими ливарними властивостями, у зв'язку з чим широко використовуються для виготовлення різноманітних виливків. Ливарні властивості чавуну підвищуються зі зменшенням його температурного інтервалу кристалізації. Чавуни мають достатню міцність, а при значній кількості цементиту в структурі - добру зносостійкість. З огляду на невисоку пластичність чавуни не можна обробляти тиском. Чавун, як правило, дешевший від сталі. Механічні властивості чавунів і галузі їх застосування визначаються структурою, на формування якої впливає не лише хімічний склад, але й швидкість охолодження.

За ***структурою*** чавуни поділяють на білі, сірі (чавуни з пластинчастим графітом), ковкі (чавуни з пластівчастою формою графіту) та високоміцні (чавуни з кулястим графітом).

**1. Білі чавуни**

**Білі чавуни** це такі, в яких увесь вуглець перебуває у хімічній сполуці Fe3С. Їх злами мають білий колір.

Формування структури білих чавунів системи Fe - Fe3С відбувається коли на лінії ліквідус із рідкого розчину виділяються кристали аустеніту й первинного цементиту (схеми структур представлено на рис. 22.1). На ділянці ЕСF (див. рис. 5.16) лінії солідус відбувається евтектична реакція з утворенням ледебуриту. Між лініями ЕСFі РSК із аустеніту виділяється вторинний цементит, а на лінії РSК аустеніт розпадається на дисперсну двофазову структуру - перліт. Отже, у структурі всіх білих чавунів наявна дуже тверда й крихка евтектика - ледебурит. Білі чавуни не застосовують для виготовлення деталей машин, оскільки вони мають високу твердість і крихкість.



Рисунок 3.3.1- Структури білих чавунів: доевтектичного (а), евтектичного (б) та заевтектичного (в)

**2. Графітизація чавунів**

На відміну від білих, сірі, ковкі й високоміцні чавуни широко використовують у промисловості як конструкційні матеріали. Характерною структурною особливістю сірих, ковких й високоміцних чавунів є вкраплення графіту в металевій основі. Порівняно з основою міцність і пластичність графіту дуже малі. Вивчення графітизації має не лише теоретичне, але й важливе прикладне значення.

**Графітизація -** виділення графіту з рідкого й твердого розчинів, а також з цементиту. Графіт є однією з модифікацій вуглецю (рис. 22.2). У залізовуглецевих сплавах графіт, як і цементит, може перебувати в рівновазі з рідким розчином, аустенітом й феритом.



Рисунок 3.3.2 - Кристалічна структура графіту

Залежно від термодинамічних і кінетичних умов кристалізації у чавунах формується графіт або цементит. Зазначимо, що за концентрацією вуглецю аустеніт (до 2,14 % С) і рідкий розчин (2,14...6,67 % С) ближчі до цементиту (6,67 % С), ніж до графіту (100 % С). Зважаючи на важливу роль дифузійних процеcів (кінетичних умов) під час формування цементиту й графіту, утворення цементиту вірогідніше, оскільки для його формування потрібні менші сумарні переміщення атомів заліза й вуглецю, ніж для утворення графіту. Водночас вільна енергія суміші аустеніт + цементит вища, ніж суміші аустеніт + графіт, тобто утворення графіту знижує вільну енергію системи. Тому під час тривалого нагрівання з цементиту виділяється графіт. Отже, порівняно з цементитом графіт - стабільніша фаза.

Оскільки для виділення графіту необхідна значна інтенсифікація дифузійних процесів, збільшення швидкості охолодження чавуну буде гальмувати ці процеси, створюючи сприятливі умови для утворення метастабільної фази - цементиту.

Знаючи закономірності формування високовуглецевих фаз - графіту й цементиту, можна керувати процесами структуроутворення в чавунах. Якщо графічно представити схему зміни термодинамічного потенціалу G (вільної енергії) при кристалізації чавунів, то на графіку будуть присутні три лінії (рис. 22.3). Лінія GР показує зміну G рідкої фази зі зміною температури; лінія GА+Ц показує зміну G суміші фаз аустениту і цементиту; лінія GА+Г - зміну G суміші фаз аустениту і графіту.



Рисунок 3.3.3 - Схема зміни термодинамічного потенціалу рідкого сплаву (GР), сумішей аустеніт+цементит (GА+Ц) і аустеніт+графіт (GА+Г) зі зміною температури

Види графіту в чавунах представлено на рисунку 3.3.4.



Рисунок 3.3.4 - Схеми різновидів графітів, що мають місце в чавунах: а - платинчатий, б - пластівчатий, в - кулястий

В залежності від виду графіту розрізнять види чавуну, що наведено на рисунку 3.3.5



Рисунок 3.3.5 - Структури графітних чавунів (схеми): а - сірій чавун (СЧ); б - ковкий чавун (КЧ); в - високоміцний чавун (ВЧ)

**3. Вплив домішок і швидкості охолодження на структуру та властивості чавунів**

***Постійні домішки*** ***чавунів*** (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 й 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 виливків.

***Сірка*** - шкідлива домішка, що погіршує механічні й ливарні властивості чавуну. Вона сильніше від марганцю протидіє графітизації й 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. Фосфор розчиняється у фериті до граничної концентрації 0,3 %. Коли концентрація більша, фосфор крім твердого розчину утворює з вуглецем і залізом потрійну легкоплавку евтектику. Залежно від кількісного співвідношення компонентів температура плавлення евтектики коливається від 950 до 980 °С. Структура фосфідної евтектики характеризується підвищеною твердістю. Чавуни з високою концентрацією фосфору широко використовують для художнього лиття.

З-поміж **легувальних** (тобто спеціально введених) 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***, як уже зазначалося, спричинює все більше відхилення від рівноважних умов кристалізації: гальмує виділення графіту й 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 вуглецю і кремнію та швидкість охолодження, можна досягти бажаної структури металевої основи сірого чавуну.

**4. Сірі чавуни (з пластинчатим графітом)**

**Чавуни з пластинчастим графітом** це такі чавуни, в структурі яких 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) (рис. 3.3.6).



Рисунок 3.3.6 -  Мікроструктура (х 100) чавунів з пластинчастим графітом: а - феритного; б - феритно-перлітного

Перетворення, які відбуваються під час графітизації в рівноважних умовах, можна простежити за діаграмою залізо-графіт (див. рис. 22.5).

На формування структури чавуну з пластинчастим графітом в промислових умовах кристалізації 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 і кремнію з одного боку й зменшуючи сумарну масову частку марганцю і сірки з другого, можна регулювати співвідношення між вільним та хімічно зв'язаним вуглецем. Що більше в чавуні вуглецю та кремнію і менша швидкість охолодження виливка, то більше виділяється графіту.

***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 ( = 100...350 МПа, табл. 22.1) і пластичністю через особливості форми графітових вкраплень з гострими краями. Такі вкраплення можна розглядати як сильні внутрішні концентратори напружень або навіть як мікротріщини.

Таблиця 3.3.1 - Марки, механічні та фізичні властивості чавунів з пластинчастим графітом

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Марка чавуну** | **Механічні властивості** | **Фізичні властивості** |
| **http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/d1/7b/f3/05/51/5b/cb/fc/f9/80/89/52/18/42/bb/r5t11.files/image020.gif, МПа,****не менше ніж** | **НВ** | **густина γ, кг/мhttp://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/d1/7b/f3/05/51/5b/cb/fc/f9/80/89/52/18/42/bb/r5t11.files/image021.gif** | **лінійна усадка ε, %** |
| СЧ 10СЧ 15СЧ 20СЧ 25СЧ 30СЧ 35 | 100150200250300350 | 120...205130...241143...255156...260163...270179...290 | 680070007100720073007400 | 1,01,11,21,21,31,3 |

***Умовне позначення марки***має літери СЧ - сірий чавун й цифри - значення мінімальної границі міцності матеріалу на розрив в 10 х МПа.

Міцність чавунів з пластинчастим графітом можна підвищити легуванням, поверхневим гартуванням, механоімпульсною обробкою та іншими методами.

**5. Ковкі чавуни**

**Ковкі** це **чавуни** з пластівчастою формою графіту, отримані внаслідок спеціального довготривалого відпалу виливків з білого чавуну. Щоб отримати ковкий чавун, необхідно виготовити виливки білого чавуну, потім їх відпалити з метою графітизації. Утворений внаслідок відпалу графіт має компактну майже рівноосьову, але не сферичну форму (рис. 22.8). Назва ***ковкий чавун*** умовна, тому що виливки 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 й пластичніші, ніж сірі. Залежно від режиму відпалу металева основа ковкого чавуну може бути феритною, перлітною й рідше - феритно-перлітною.



Рисунок 3.3.7 - Мікроструктура (х 300) ковкого феритного чавуну

Щоб не допустити навіть часткової графітизації білого чавуну під час його охолодження в ливарній формі, треба вибирати товщину стінок виливка 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 % Sі; 0,3...1,0 % Мn; до 0,2 % Р і до 0,18 % S. Тут привертає увагу порівняно низький вміст вуглецю, кремнію й марганцю. Після відпалу на графітизацію чавуни з такою низькою часткою вуглецю матимуть у структурі небагато компактних графітових вкраплень, що сприятиме поліпшенню їхніх механічних властивостей (, НВ, КСU, δ). Тому, що вища міцність ковкого чавуну потрібна, то менше вуглецю повинно бути у вихідному білому чавуні. Перевищення вмісту вуглецю понад зазначену норму неминуче призведе до часткового виділення пластинчастого графіту у виливках білого чавуну під час їх охолодження, а підвищення вмісту марганцю негативно вплине на графітизацію під час відпалу.

Відпал білого чавуну виконують в одну або дві стадії залежно від структури, яку необхідно сформувати.

***Двостадійний відпал*** починається з повільного нагрівання виливків білого чавуну до 930... 1050 °С, внаслідок чого отримують структуру ледебурит + аустеніт + вторинний цементит. Виливки витримують при цих температурах протягом 10...15 год, щоб вторинний цементит і цементит ледебуриту розпався на аустеніт А і графіт пластівчастий Г (***перша стадія графітизації***):

* Ц → А + Г. (22.3)

Закінчивши першу стадію, виливок повільно охолоджують приблизно до температури 760 °С, щоб вторинний цементит, що поступово виділяється з аустеніту, теж розпався за реакцією .

***Друга стадія графітизації***, яка триває близько 30 год, відбувається або при сталій температурі (дещо нижчій від температури евтектоїдного перетворення), або під час дуже повільного охолодження в інтервалі температур 760...720 °С. В першому і другому випадках аустеніт повністю розпадається і цементит евтектоїду переходить у графіт за реакцією (22.2).

Таким чином, під час двостадійного відпалу формується феритна структура з рівномірно розподіленим в об'ємі виливка пластівчастим графітом (див. рис. 5.28).

***Одностадійний відпал*** передбачає тільки високотемпературну (t = 930...1050 °С) стадію графітизації. Після цього виливок швидко охолоджують до кімнатної температури. Під час одностадійного відпалу формується структура перліт+пластівчастий графіт.

Основною перевагою ковких чавунів є однорідність їх властивостей в перерізі виливка та майже повна відсутність залишкових напружень. Водночас варто зазначити, що графітизація доволі тривала й енергомістка, що стримує широке застосування ковких чавунів у машинобудуванні.

Залежно від механічних властивостей ковкі чавуни відповідно маркують. ***Марки ковких чавунів*** (табл. 22.2) позначають літерами КЧ й числами, перше з яких відповідає границі міцності на розрив в МПа, а друге - відносному видовженню - δ у %.

Таблиця 3.3.2 - Марки та механічні властивості ковких чавунів

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Марка чавуну** | **http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/d1/7b/f3/05/51/5b/cb/fc/f9/80/89/52/18/42/bb/r5t11.files/image026.gif, МПа** | **δ, %** | **НВ** |
|  |  |
| КЧ 30-6 | 300 | 6 | 100...163 |
| КЧ 33-8 | 330 | 8 | 100...163 |
| КЧ 35-10 | 350 | 10 | 100...163 |
| КЧ 37-12 | 370 | 12 | 110...163 |
| КЧ 45-7 | 450 | 7 | 150...207 |
| КЧ 50-5 | 500 | 5 | 170...230 |
| КЧ 55-4 | 550 | 4 | 192...241 |
| КЧ 60-3 | 600 | 3 | 200...269 |
| КЧ 65-3 | 650 | 3 | 212...269 |
| КЧ 70-2 | 700 | 2 | 241...285 |
| КЧ 80-1,5 | 800 | 1,5 | 270...320 |

Феритні чавуни (КЧ 30-6...КЧ 37-2) характеризуються високою пластичністю (δ = 6...12 %), а перлітні (КЧ 45-7...КЧ 80-1,5) - підвищеною міцністю й твердістю.

З ковких чавунів виготовляють виливки, що працюють під ударними або знакозмінними циклічними навантаженнями (корпуси редукторів, корпуси задніх мостів вантажних автомобілів, вилки карданних валів, муфти, арматуру).

**6. Високоміцні чавуни (з кулястим графітом)**

**Чавун з кулястим графітом** має в металевій основі графіт кулястої форми. Структура металевої основи - ферит (рис. 3.3.8), ферито-перліт або перліт. Чавун з феритною основою найменш міцний, але високопластичний, а чавун з перлітною основою - міцний, але малопластичний.



Рисунок 3.3.8 - Мікроструктура (х 300) феритного чавуну з кулястим графітом

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 ( = 350... 1000 МПа, δ = 22...2 %) й успішно конкурують з ковкими чавунами та сталями.

Таблиця 3.3.3 - Марки та механічні властивості чавунів з кулястим графітом

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Марка чавуну** | **http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/d1/7b/f3/05/51/5b/cb/fc/f9/80/89/52/18/42/bb/r5t11.files/image020.gif, МПа** | **http://ocw.sumdu.edu.ua/stream/43/d1/7b/f3/05/51/5b/cb/fc/f9/80/89/52/18/42/bb/r5t11.files/image028.gif, МПа** | **δ , %** | **НВ** |
|  | **не менше ніж** |  |  |
| ВЧ 350-22 | 350 | 230 | 22 | 140...170 |
| ВЧ 400-15 | 400 | 260 | 15 | 140...202 |
| ВЧ 450-10 | 450 | 320 | 10 | 140...225 |
| ВЧ 500-7 | 500 | 340 | 7 | 153...245 |
| ВЧ 600-3 | 600 | 390 | 3 | 192...277 |
| ВЧ 700-2 | 700 | 420 | 2 | 228...302 |
| ВЧ 800-2 | 800 | 490 | 2 | 248...351 |
| ВЧ 900-2 | 900 | 600 | 2 | 280...360 |
| ВЧ 1000-2 | 1000 | 700 | 2 | 270...360 |

***Марки чавунів з кулястим графітом*** позначають літерами ВЧ - високоміцний чавун й двоцифровим числом, що означає мінімальну межу міцності чавуну на розрив в МПа та через дефіс - мінімальне значення відносного видовження у відсотках.

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 вали, валки вальцювальних станів, шаботи ковальських молотів, корпуси парових турбін, супорти, різцетримачі й планшайби металорізальних верстатів.