

МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ СПЛАВІВ

ДЕФОРМАЦІЙНА ОБРОБКА.

Деформація- зміна форми і розмірів твердого тіла під впливом прикладених до нього навантажень. Розрізняють деформацію пружну (оборотну) і пластичну (необоротну).

Пружною деформацією називають таку, яка зникає після зняття навантажень, тобто тіло відновлює свою початкову форму.

Пластична деформація залишається після зняття зовнішньої навантаженні, (тіло не відновлює початкову форму і розміри).

При пластичній деформації змінюється не тільки форма, а й властивості деформованого металу. У реальному полікристалічному металі відбувається структурні зміни:

- зміна форми зерен (кристалітів) – вони витягаються в напрямку найбільш інтенсивної течії металу, утворюється волокниста структура (рис.1)

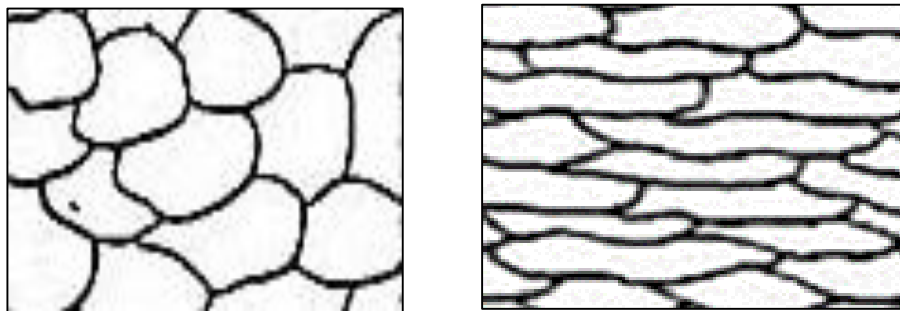


Рис.1- Схема структурних змін при холодній деформації металу

- орієнтація певних кристалографічних осей кристалів у напрямі течії металу. Переважна орієнтація зерен називається *текстурою*. Текстура металів обумовлює анізотропію їх механічних, магнітних і електричних властивостей. У загальному випадку анізотропія властивостей металу негативно позначається при подальшій його обробці та експлуатації виробів. У деяких випадках метал спеціально прагнуть створити максимально текстурованим в певних напрямках для підвищення механічної міцності або магнітно-електричних властивостей.

- збільшення щільності дислокацій (**ρ -сумарна довжина дислокацій в одиниці об'єму (см/см³)**), що надає найбільший вплив на зміни властивостей металів. До деформування щільності дислокацій в металі складає $\rho \approx 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, то після холодної деформації при великих ступенях деформацій збільшується до $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$. При такій щільності дислокації блокують одна одну, і їх рухливість

багаторазово знижується. З цієї причини знижується пластичність металу і зростає його міцність (рис. 2).



Рис. 2-Вплив щільності дислокацій при холодному деформуванні на міцність металу

Зміни, внесені холодною деформацією в структуру і властивості металу не зворотні. Але вони можуть бути усунені, наприклад за допомогою термічної обробки, а саме відпалом [1,2].

Для зняття структурної нестабільності, спричиненої наклепуванням, застосовують відновлювальні термічні процеси, які дають змогу усунути деформаційні зміцнення й підвищити пластичні властивості сплаву. Залежно від температурного впливу на деформовані структури умовно розрізняють такі відновлювальні процеси: **повернення або зворот (відпочинок і полігонізація) та рекристалізація.**

Відпочинок і полігонізацію називають зворотом. Для цих стадій характерно лише часткове відновлення властивостей.

Рекристалізація – процес утворення нових зерен, який відбувається за підвищених температур. Рекристалізація знімає деформаційне надклепування, метал набуває рівноважної структури з мінімальною кількістю дефектів і підвищеною в'язкістю. Формула А.А. Бочвара зв'язує температуру початку рекристалізації $T_{рек}$ із температурою плавлення металу $T_{пл}$, К (1):

$$T_{рек} = \alpha \cdot T_{пл}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від чистоти металу: чим чистіше метал, тим нижча температура початку рекристалізації.

У цьому випадку відбувається структурні зміни, при яких за рахунок додаткової теплової енергії, збільшується рухливість атомів і в твердому металі без фазових перетворень з безлічі центрів ростуть нові зерна з меншою щільністю дислокацій, які замінюють собою витягнуті "деформовані зерна".

Таким чином, явище зародження і зростання, нових рівновісних зерен замість деформованих, витягнутих, яке відбувається при певних температурах, називається **рекристалізацією**. Зерна в металі утворюються тим дрібніше, чим більше ступінь деформації. При нагріві деформованого (наклепаного) металу відбувається зменшення і підвищення пластичності металу (рис. 3).



Рис. 3 - Зміна характеристик міцності (σ_B , $\sigma_{0,2}$) і пластичності (δ) наклепаного металу при нагріванні; t_p – температура початку рекристалізації.

відпочинок – здійснюється при низьких температурах нагрівання $(0,1 \dots 0,3)T_{пл}$; дає змогу частково (на 10...30%) зняти деформацію зміцнення. Перерозподіл та зменшення кількості точкових дефектів супроводжується зниженням рівня пружних деформацій. Основна частина пружної енергії,

внесеної деформацією, пов'язана з високою густиною дислокацій, рухомість яких при температурах відпочинку обмежена. Мікроструктура не змінюється, але структурні зміни відбуваються на субмікроскопічному рівні й простежуються за результатами дослідження фізико-механічних властивостей.

- *полігонізація* – розвивається при підвищенні температури нагрівання $(0,3 \dots 0,4)T_{пл}$. Звільнившись від атомів домішок, дислокації починають рухатися, при цьому їх щільність значно зменшується. Надлишкові крайові дислокації трансформуються в мало кутові межі, що поділяють кожне зерно на субзерна (комірки). Утворюється стабільна дислокаційна структура – полігональних меж, яка при певних умовах в сплавах складної композиції може бути стабільною та сприяє збільшенню довготривалої міцності при високих температурах (жароміцності). В багатьох випадках зміну в дислокаційній структурі можна виявити лише при великих збільшеннях за допомогою електронного мікроскопа.

- *рекристалізація* – процес утворення нових зерен, який відбувається за підвищених температур. Рекристалізація знімає деформаційне наклепування, метал набуває рівноважної структури з мінімальною кількістю дефектів і підвищеною в'язкістю. Формула А.А. Бочвара зв'язує температуру початку рекристалізації $T_{рек}$ із температурою плавлення металу $T_{пл}$, K :

$$T_{рек} = \alpha \cdot T_{пл},$$

де α – коефіцієнт, що залежить від чистоти металу, чим чистіше метал, тим нижча температура початку рекристалізації.

Процес рекристалізації протікає у дві стадії. Розрізняють рекристалізацію первинну (або оброблення) та вторинну (збірну).

Первинною рекристалізацією називають саме процес утворення нових зерен на місці деформованих, витягнутих. Пластично деформовані метали можуть рекристалізуватися тільки після деформації, ступінь якої перевищує певну мінімальну величину – критичний ступінь деформації. Якщо ступінь деформації менший від критичного, то нові зерна при нагріванні не утворюються. Критичний ступінь деформації невеликий (2–8%).

Чим вищий ступінь деформації ϵ , чим більше дефектів має структура, тим менш вона стійка, тим більшого стимулу набуває для відновлення рекристалізацією.

Отже високий ступінь деформації полегшує процес рекристалізації і знижує мінімальну температуру рекристалізації.

Вторинна рекристалізація. Після завершення первинної рекристалізації у ході подальшого нагрівання (підвищення температури) відбувається зростання одних кристалів (зерен) за рахунок інших. При цьому зерна з увігнутими межами “поїдають” зерна з опуклими межами.

Даний процес обумовлений прагненням системи зменшити запас вільної енергії завдяки збільшенню зерен і скорочення сумарної поверхні.

Розмір зерна після рекристалізації суттєво впливає на властивості металу. Метали та сплави з дрібним зерном значно міцніші.

Температура рекристалізації має важливе практичне значення. Щоб відновити структуру і властивості наклепаного металу (наприклад, у разі необхідності продовжити обробку тиском, прокатуванням, волочінням тощо), його нагрівають вище температури рекристалізації. Таку обробку називають рекристалізаційним відпалом.

Пластична деформація вище температури рекристалізації до певної міри зміцнює метал, проте ефект цей нівелює подальша рекристалізація. Обробку металу тиском (вище температури рекристалізації), при якій немає зміцнення (наклепування), називають *гарячою обробкою тиском*. *Рекристалізація*, що відбувається в процесі гарячої деформації називають *динамічною*, а також динамічним називають і зворот (відпочинок та полігонізацію).

Перед гарячою обробкою тиском метали і сталі нагрівають до певної температури (початок гарячої обробки тиском) для підвищення їх пластичності і зменшення опору деформації. Однак у процесі обробки температура металу знижується. Мінімальна температура, при якій можна робити обробку, називається температурою закінчення обробки тиском. Область температури між початком і закінченням, в якій метал або сплав має найкращу пластичність, найменшу схильність до зростання зерна і мінімальний опір деформуванню, називають температурним інтервалом гарячої обробки тиском.

При цьому температура нагріву металу вибирається такою, щоб не виникли негативні перетворення в структурі:

- перепал-, характеризується окисленням металу на межах зерен, в результаті чого він стає крихким і при ударі руйнується;
- перегрів супроводжується різким зростанням розмірів зерен, внаслідок чого погіршуються механічні властивості.

В результаті холодної обробки поверхня виробу має високу точність, стає більш міцною. Холодну обробку тиском застосовують, як правило, для заготовок, які пройшли попередню гарячу обробку, щоб поліпшити якість поверхні й підвищити точність розмірів. При гарячій обробці тиском наклеп відсутній. Якщо температура нагріву недостатня, у сталі зберігаються сліди наклепу. При надмірному нагріві утворюється перепал сталі від чого вона втрачає пластичність. Перепалена сталь – це брак і до подальшої обробки не допускається. Гаряча обробка металів тиском має ряд позитивних якостей: складові частини металу розподіляються більш рівномірно, ніж до обробки; зменшуються розміри зерен, що призводить до поліпшення механічних властивостей; метал стає більш щільним, бо газові бульбашки й ущільнення від тиску заварюються (спресовуються). Сталь, оброблена гарячим способом, має

волокнисту будову. Механічні властивості такої сталі вздовж волокон кращі, ніж властивості сталі упоперек волокон (подібно до того, як це спостерігається у дерева). Відмінність властивостей сталі вздовж і впоперек волокон є її недоліком.

ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМОРФНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Поліморфне (алотропічне) перетворення це зміна решітки кристалічного тіла в залежності від зовнішніх параметрів: температури або тиску. Поліморфні перетворення відбуваються в багатьох металах, особливо перехідних.

Багато металів в залежності від температури можуть існувати в різних кристалічних формах або, як їх називають, в різних поліморфних модифікаціях. В результаті поліморфного перетворення атоми кристалічного тіла, що мають ґратку одного типу, перебудовуються таким чином, що утворюється кристалічна ґратка іншого типу.

Поліморфне перетворення протікає внаслідок того, що утворення нової модифікації супроводжується зменшенням енергії Гіббса (термодинамічного потенціалу).

На рис. 4 показані діаграма фазової рівноваги і зміна термодинамічного потенціалу поліморфного металу в твердому стані при постійному тиску. В області температур, що лежать вище T_0 , стабільна β модифікація, оскільки вона має менший термодинамічний потенціал. Модифікація α існує в цих умовах лише в метастабільному стані.

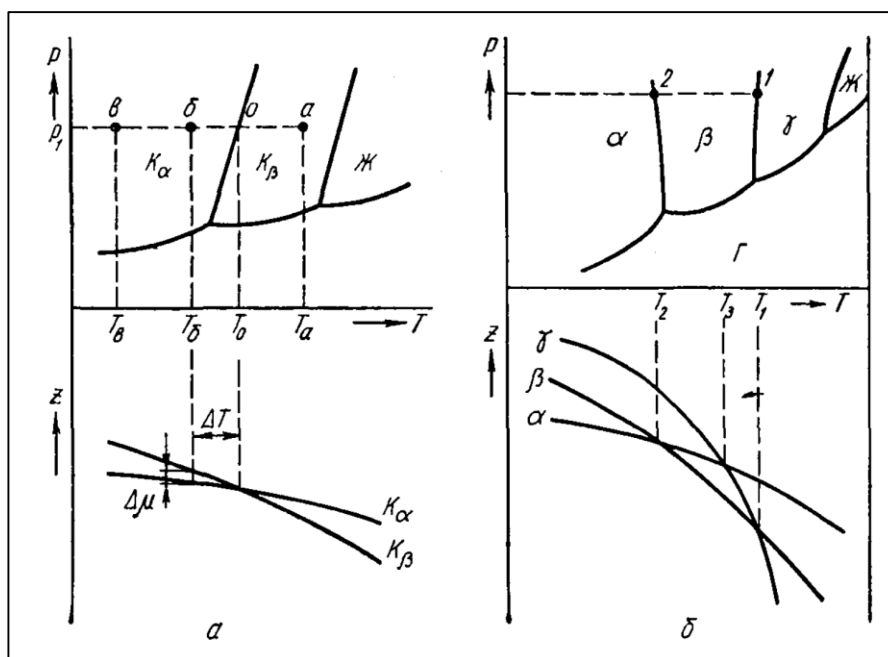


Рис.4- Діаграми фазових станів (вгорі) і термодинамічні потенціали (внизу) металу з двома (а) і трьома (б) поліморфними модифікаціями [1]

При $T < T_0$ стабільна упаковка атомів, притаманна α -модифікації, оскільки її термодинамічний потенціал нижче, ніж-модифікації β . При $T = T_0$ обидві модифікації мають однакові термодинамічні потенціали і стабільно співіснують.

В умовах рівноваги поліморфне перетворення протікає при постійній температурі (критична точка) і супроводжується виділенням теплоти, якщо перетворення йде при охолодженні, або поглинанням теплоти в разі нагрівання.

Переходи однієї модифікації в іншу відбуваються при зміні тиску і температури. Зниження, наприклад, температури нижче T_0 призведе до переходу β -Модифікація в α .

Підвищення температури вище T_0 викликає перетворення модифікації α в β . Термодинамічний потенціал металу (енергія Гіббса) при цих перетвореннях знижується.

Поліморфні перетворення здійснюються шляхом утворення і зростання зародків, які виникають в найбільш дефектних (з точки зору кристалічної структури) місцях: на кордонах зерен і блоків, так як це термодинамічно вигідно через наявність поверхні розділу між старою і новою фазами. Крім того, в прикордонній зоні полегшується пластична деформація, яка веде до зменшення пружних спотворень при утворенні зародка.

Перетворення однієї модифікації в іншу називають перекристалізацією.

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ

Перша особливість пов'язана зі зміною питомого об'єму металу. Якщо при затвердінні об'ємні зміни помітно не впливають на утворення зародків внаслідок плинності (податливості) розплаву, то при перекристалізації їх роль велика. Зміна об'єму металу супроводжується деформацією вихідних фаз і тих, що утворюються, для чого потрібна додаткова енергія. Завдяки цьому енергетичний стимул перетворення - різниця термодинамічних потенціалів - зменшується на величину енергії деформації.

Друга особливість фазових перетворень в твердих металах пов'язана з меншою, ніж в рідині, рухливістю атомів. Швидкість дифузії в рідких металах на кілька порядків вище, ніж в твердих - зростання кристалів в результаті індивідуальних переходів атомів відбувається швидше в рідкому металі, ніж в твердому. Ця різниця особливо помітна, якщо поліморфне перетворення відбувається при температурах значно нижче точки плавлення.

Утворення зародків нової фази на свобідній поверхні полегшене, бо супроводжується невеликим збільшенням поверхневої енергії. На межах зерен, у порах і тріщинках в середині кристалів зародження полегшується. Ефективними можуть бути і включення домішок.

Відомі поліморфні перетворення для таких металів: $Fe\alpha \leftrightarrow Fe\gamma \leftrightarrow Fe\delta$; $Ti\alpha \leftrightarrow Ti\beta$; $Mn\alpha \leftrightarrow Mn\beta \leftrightarrow Mn\gamma \leftrightarrow Mn\delta$; $Sn\alpha \leftrightarrow Sn\beta$; Ca, Li, Te, Na, Cs, Sr, Zn, РЗМ - металів тощо.

*МЕХАНІЗМИ ПОЛІМОРФНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ
В МЕТАЛАХ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ*

Поліморфне перетворення в залежності від природи металу і зовнішніх умов може здійснюватися за двома механізмами: **дифузійним нормальним і бездифузійним зсувним (мартенситним)**.

Дифузійний механізм поліморфного перетворення характерний для малих переохолоджень металу, а бездифузійний - для великих. Незалежно від механізму перетворення величина зміщення атомів при поліморфному перетворенні не перевищує міжатомної відстані. Різниця двох механізмів полягає в характері переміщень атомів від решітки вихідної фази до кристалічної решітки нової фази.

При поліморфному перетворенні по дифузійному нормальному механізму нова фаза утворюється шляхом переміщення одиночних атомів, а по бездифузійному механізму - шляхом колективного (групового) переміщення атомів -зсувом. Поліморфне перетворення по мартенситному механізму відбувається в інтервалі температур (при постійній температурі воно до кінця не доходить). Це явище до теперішнього часу остаточно не має пояснення.

У результаті поліморфного перетворення по **дифузійному нормальному** механізму утворюються нові кристалічні зерна, які мають інший розмір і форму. Тому таке перетворення називають **перекристалізацією**. Якщо нагрівання металу проведено до температури, що трохи перевищує температуру поліморфного перетворення (критичної точки), утворюється дуже **дрібне зерно**.

Таким чином перекристалізацію можна використовувати для подрібнення великого зерна, отриманого при кристалізації з рідкого стану чи попереднього нагрівання до високих температур. При цьому підвищуються механічні властивості, а саме міцність, твердість, ударна в'язкість і навіть пластичність.

Бездифузійний зсувний (мартенситний) механізм характерний для металів з низькою температурою перетворення. Він також реалізується при підвищених швидкостях охолодження. Внаслідок великої пружності металу і малої рухливості атомів за низьких температур мартенситне перетворення (МП) відбувається шляхом кооперативного координаційного зміщення атомів на віддаль, що менша за міжатомну. Цей процес подібний до двійникування, яке фіксують під час пластичної деформації (ПД) і яке також реалізується шляхом кооперативного переміщення всіх атомів у певному напрямі. Як і для МП, тип ґратки тут не змінюється і деформація протікає без розриву міжатомних зв'язків.

В результаті поліморфне перетворення супроводжується стрибкоподібною зміною всіх властивостей металів або сплавів: питомого об'єму, теплоємності, теплопровідності, електричної провідності, магнітних властивостей, механічних і хімічних властивостей і т. д. **При мартенситному механізмі виникають суттєві викривлення в кристалічній ґратці та збільшується кількість дефектів кристалічної будови, що й призводить до значного зміцнення та підвищення твердості, але пластичність знижується.**

Поліморфні перетворення відбуваються не тільки в чистих металах, але й у сплавах. При поліморфних перетвореннях велику роль відіграють домішки. Характер впливу домішок пов'язаний з їх розчинністю в металі. Якщо домішка не розчиняється у твердому металі, поліморфне перетворення в сплавах відбувається так само, як описано вище. У цьому випадку, як і для чистого металу, можна вказати певну температуру рівноваги обох модифікацій, яка не залежить від складу сплаву.

На рис. 5 наведено діаграму стану подвійної системи, компонент *A* якої має поліморфну точку (T^A_o) вище евтектичної температури, а компонент *B* нижче евтектичної (T^B_o).

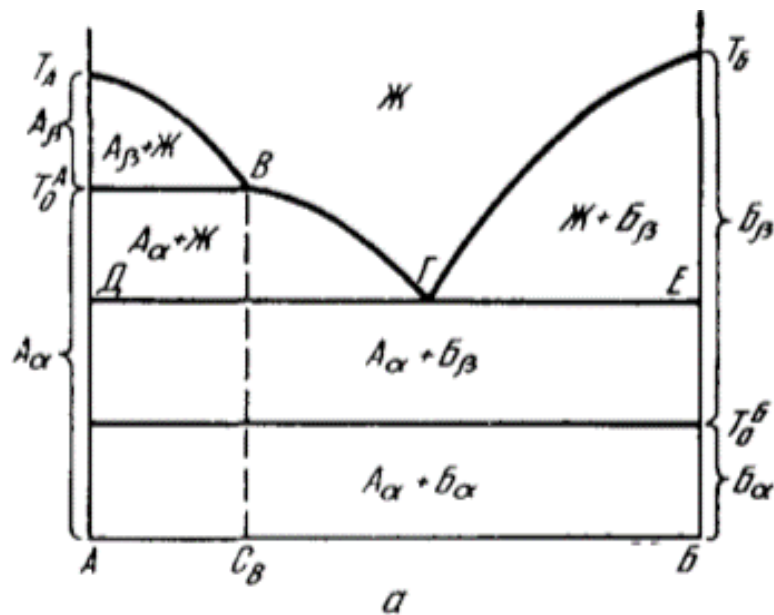


Рис.5 - Діаграма стану поліморфних компонентів, що не розчиняються у твердому стані

Перетворення $A\beta \leftrightarrow A\alpha$ можливі тільки в сплавах, склад яких лежить в інтервалі концентрацій AC_B . При охолодженні до температур нижче T^A_o кристали β -модифікації компонента *A* зазнають поліморфне перетворення в $A\alpha$. Поліморфне перетворення $B\alpha \leftrightarrow B\beta$ можливі у всіх сплавах даної системи і відбуваються після затвердіння

З утворенням твердих розчинів виникають зміни. Розглянемо спочатку поліморфні перетворення в системі компонентів, що необмежено розчиняються в рідкому і твердому станах (Рис.6).

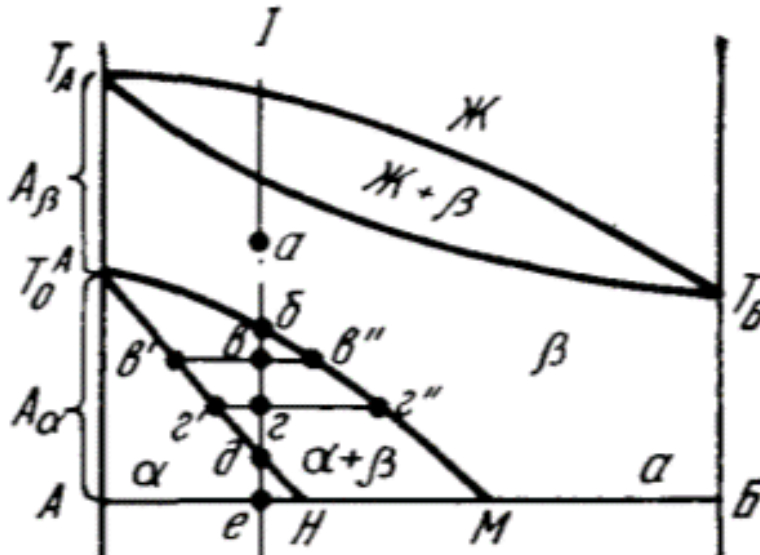


Рис. 6 – Діаграма стану компонентів :А-поліморфний, Б-неполіморфний

Область нижче лінії солідуса розділена на три ділянки:

- $AT_0^A H$, де сплави стійкі в однофазному стані α , що є твердим розчином неполіморфного компонента Б в α -модифікації компонента А;
- $T_0^A T_A T_B B M$, де сплави знаходяться в стані β , твердому розчині β модифікації компонента А і компонента Б;
- $T_0^A M H$, де стабільним є двофазний стан $\alpha + \beta$.

При $T = T_a$ сплав І складається із кристалів β -розчину. Цей стан стійкий до температури T_b . Якщо охолодити сплав нижче T_b , β -фаза виявиться переохолодженою. Якщо часу перебування сплаву в переохолодженому стані при $T = T_v$ достатньо, щоб виникли зародки α -розчину, то почнеться поліморфне перетворення. Зародки α -фази відрізняються від вихідної β -фази упаковкою атомів. Однак появи великих флуктуацій з упаковкою атомів, що властива α -фазі, недостатньо для початку фазового перетворення. Такі флуктуації в процесі теплового руху атомів зникають. Зародки α -фази ростуть в тому випадку, якщо вони відрізняються від β -фази також і складом.

Енергія, яка необхідна для формування зародка критичного розміру, витрачається не тільки на утворення поверхні розділу, а й на деформацію α та β -фаз, спричинену об'ємними змінами.

Поліморфне перетворення в металі відбувається і при нагріванні. Стабільний при кімнатній температурі α -розчин стає метастабільним при

температурі вище T_d , і в ньому виникають зародки β -розчину, збагаченого компонентом Б. При підвищенні температури кількість β -фази збільшується. Поліморфне перетворення закінчується повною заміною α -фази на β , коли температура сплаву перевищить T_b .

Описане вище поліморфне перетворення твердого розчину при нагріванні та охолодженні складається з перебудови ґратки та дифузійного перерозподілу компонентів між фазами. Його зазвичай називають нормальним дифузійним. Нормальна перекристалізація $\beta \leftrightarrow \alpha$ відбувається у результаті неупорядкованих переходів атомів через межу поділу фаз і супроводжується перерозподілом атомів компонентів, тобто їх дифузійними переміщеннями на великі відстані. Це реалізується при повільному охолодженні.

В сплавах поліморфні перетворення можуть відбуватися не за двома механізмами, як у металах, а за 4 механізмами:

основні механізми

- 1. нормальний дифузійний;**
- 2. зсувний бездифузійний (мартенситний);**

проміжні механізми

- 3. зсувний дифузійний;**
- 4. нормальний бездифузійний.**

Слід відзначити, що в металах і сплавах, компоненти яких поліморфні можливі методи впливу на структуру і властивості за рахунок фазових перетворень, що відбуваються при нагріві та охолодженні.

Навіть при повільному нагріванні та охолодженні при поліморфному перетворенні утворення нових фаз відбувається в найбільш дефектних ділянках таких, як потрійні перехрестя меж зерен, на самих межах зерен, тобто з одного зерна формується декілька кристалів нової фази. При цьому подрібнюється структура і зростає твердість і міцність.

При пришвидшеному охолодженні перетворення відбуваються за зсувним бездифузійним (мартенситним) механізмом, в цьому випадку міцність і твердість підвищуються в декілька разів. **Такий процес називається гартуванням з поліморфним перетворенням, а мінімальна швидкість охолодження при якій відбувається мартенситне перетворення називається критичною.**

ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ
(скорочено)

Термічна обробка сталі ґрунтується на властивості металу змінювати свою структуру при нагріванні й охолодженні. Шляхом термічної обробки сталі можна надавати їй різні, іноді зовсім протилежні, властивості: зробити сталевий виріб крихким і твердим, або, навпаки, м'яким і пластичним.

Термічна обробка полягає в нагріванні виробу або заготовки до певної температури, деякому витримуванні при цій температурі і наступному охолодженні з певною швидкістю. Режим нагрівання, витримування й охолодження з певною швидкістю залежить від марки виробу, його форми, розмірів та ін. Щоб зрозуміти, як змінюються структура і властивості сталі в процесі термічної обробки, розглянемо зміни, що відбуваються в структурі чистого заліза, яке є основою сталі. При нагріванні до 910°C гратки заліза мають форму об'ємноцентрованого куба, при 910°C – набувають форми гранецентрованого куба, при 1400°C – повертаються до попередньої форми об'ємноцентрованого куба. Під час охолодження всі зміни структури чистого заліза відбуваються в зворотній послідовності. У процесі зміни структури заліза змінюється його важлива властивість – здатність утворювати твердий розчин з вуглецем. При температурі до 910°C залізо майже не розчиняє в собі вуглець. Твердий розчин вуглецю в залізі при цих температурах називається феритом. При $910\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ залізо розчиняє в собі до $2,0\%$ вуглецю. У цьому разі твердий розчин вуглецю в залізі називається аустенітом. Ферит пластичний і має незначну твердість, в силу чого знижує міцність і стійкість до зношення сталі; аустеніт – у $2\text{--}2,5$ рази твердіший за ферит, він існує в сталях й чавунах тільки при температурі вище 723°C . Розглянемо структуру повільно охолодженої сталі (Рис. 20) і зміни в ній, пов'язані з нагріванням. З вмістом до $0,83\%$ вуглецю така сталь складається із зерен фериту і перліту. Перліт – це евтектоїд, що складається зерен або пластинок фериту і цементу. Перліт міцний і пластичний, добре впливає на механічні властивості сталей і чавунів. Зміна структури при нагріванні сталі починається з 723°C . У сталі, яка містить менше $0,83\%$ вуглецю, перліт поступово перетворюється на аустеніт. Структура сталі в цьому разі складається з аустеніту і фериту. При подальшому підвищенні температури ферит також перетворюється на аустеніт. Чим більше в сталі вуглецю, тим швидше (при нижчих температурах) вона набирає структуру аустеніту. З вмістом в сталі $0,83\%$ вуглецю перліт перетворюється при 723°C на аустеніт, а ця структура зберігається до початку плавлення сталі. Із вмістом в сталі більш як $0,83\%$ вуглецю перліт при температурі понад 723°C поступово перетворюється на аустеніт; структура сталі складається з аустеніту і цементиту. Під час подальшого нагрівання цементит розчиняється в аустеніті і сталь набирає структуру аустеніту. Структура сталі змінюється залежно від швидкості охолодження. Після повільного охолодження (не більш, як 100 град/год) і з вмістом менше $0,83\%$ вуглецю структура сталі складається з фериту і перліту. З вмістом $0,83\%$ вуглецю структура сталі складається цілком із перліту, а з вмістом більш як $0,83\%$ вуглецю – з перліту і цементиту. Усі зміни структури сталі під

час нагрівання у разі повільного охолодження відбуваються у зворотному порядку. Ніяких нових структур під час повільного охолодження не з'являється. За швидкого (не менше 10 град/сек.) охолодження сталі аустеніт не встигає перетворитися на перліт і перетворюється в сорбіт, троостит і мартенсит. **Сорбіт** – структурна складова з дрібних (кристалів) пластин фериту і цементиту – має вищі механічні властивості, ніж перліт; утворюється при швидкості охолодження 50-70 град/сек. **Троостит** утворюється при охолодженні зі швидкістю 80-100 град/сек; складається із пластин фериту і цементиту, але дрібніших, ніж у сорбіті. Твердість і міцність троститу вищі, ніж сорбіту. **Мартенсит** – це твердий розчин вуглецю в залізі й має структуру у вигляді голок; утворюється при швидкості охолодження більш як 150 град/сек. Мартенсит має дуже високу твердість і характеризується підвищеною крихкістю. Для нагрівання сталевих виробів при термічній обробці використовують печі різних конструкцій, які працюють на твердому, рідкому і газоподібному паливі або на електриці.

Поліморфні перетворення при охолодженні сталей.

Перлітне дифузійне перетворення. При охолодженні аустеніту з малими швидкостями нижче температури A_{r1} відбувається його перетворення в перліт рис. 7,а:



Збільшення швидкості охолодження сталі призводить до зниження температурного інтервалу фазових перетворень, збільшенню ступеня переохолодження аустеніту перед фазовим перетворенням. Зростає дисперсність ферито-цементитної структури, підвищується твердість сталі. При збільшенні швидкості охолодження відбувається проміжне бейнітне перетворення (рис.7 б)

Коли швидкість охолодження стає настільки великою, що дифузійне перетворення аустеніту у ферито-цементитні колонії стає неможливим, відбувається зміна механізму перетворення. В аустеніті відбувається нерівноважне перетворення, з утворенням нової фази мартенситу (рис. 7,в).

Мартенситне зсувне, бездифузійне перетворення. Аналогом може бути деформація двійникуванням, що призводить до значного зміцнення матеріалу.

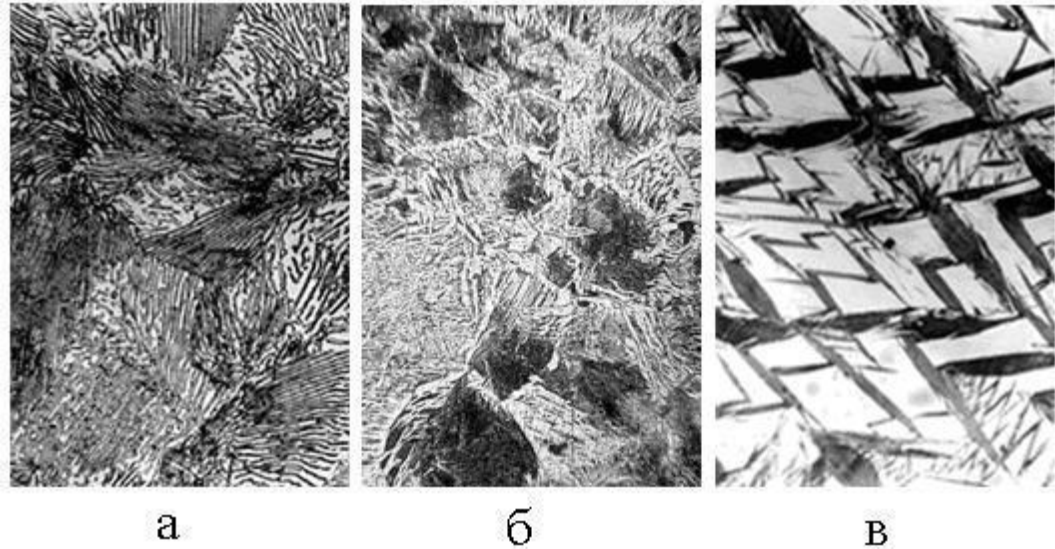


Рис. 7. Типи фазових перетворень в сталі, x1000: а – перлітне; б – бейнітне; в – мартенситне

Мартенсит пересичений твердий розчин вуглецю в α -Fe з тією же концентрацією вуглецю, що й в аустеніті. Зародження мартенситу результат втрати стійкості ґратки аустеніту під дією великих стискаючих напружень, що виникають при високих швидкостях охолодження сталей. Мартенситне перетворення сполучає зміну типу ґратки з додатковою пластичною деформацією нової ґратки рис. 8.

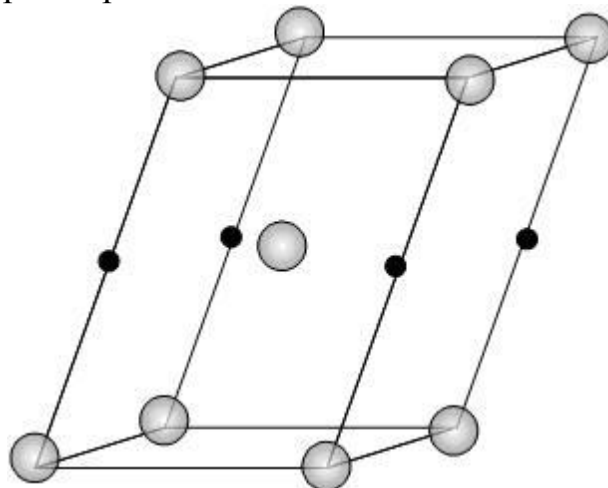


Рис. 8. Схема кристалічної ґратки мартенситу сталі

Швидкість перетворення досягає швидкості звуку в металі й нагадує проходження ударної хвилі деформації через матеріал.

Зазначені особливості перетворення пояснюють високу твердість і крихкість сталі зі структурою *мартенситу* (на честь німецького металознавця А. Мартенса).

В інтервалі температур між перлітним і мартенситним перетвореннями протікає проміжне або бейнітне перетворення.

Бейнітне перетворення сполучає особливості дифузійного та зсувного перетворень:

– аустеніт збіднюється вуглецем через виділення карбідів, як при дифузійному перетворенні;

– $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення проходить за зсувним, мартенситним механізмом.

Дифузійні процеси перерозподілу вуглецю визначають швидкість проміжного бейнітного перетворення. Вид структури бейніту (на честь німецького металознавця Е.С. Бейна) (рис. 7,б) залежить від температур залежить від температури його утворення.

СТАРІННЯ СПЛАВІВ

Старіння може розглядатися, як заключна операція **термічної обробки** окремого класу металевих конструкційних матеріалів — сплавів здатних до **старіння** (дисперсного тверднення); приводить до зростання твердості і міцності при одночасному зниженні пластичності та ударної в'язкості.

Старіння металів (англ. *precipitation hardening, age hardening*) — зміна властивостей сплаву, що протікає в часі без помітної зміни мікроструктури. Різновид старіння матеріалів, фізичне явище, що відбувається у структурі металевого матеріалу при якому відбувається його зміцнення під час вилежування або витримки при певній температурі. Крім зростання міцності, сплави, що зазнають старіння можуть набувати і інших цінних властивостей, наприклад високої коерцитивної сили.

При швидкому охолодженні від високих температур (при гартуванні або після кристалізації та гарячої пластичної деформації) метали і сплави повністю або частково зберігають атомну структуру, характерну для високотемпературного стану. В чистих металах нерівномірність цієї структури полягає у надлишковій (для низьких температур) концентрації вакансій та наявності інших дефектів кристалічної структури. У сплавах невірноваженість структури може бути пов'язана із збереженням фаз, що є нестійкими при низьких температурах. Найактуальнішим є старіння сплавів, обумовлене процесами розпаду перенасиченого твердого розчину. Стан перенасичення твердого розчину виникає після охолодження сплавів від високих температур, так як із зниженням температури розчинність домішок зменшується. Тобто в сплавах з обмеженою розчинністю компонентів, що зменшується при зменшенні температури при пришвидшеному охолодженні залишкові фази не встигають виділятися із пересиченого твердого розчину. Фіксується в метастабільному

стані пересичений твердий розчин вихідного складу. З часом в цій метастабільній фазі виділяються дрібнодисперсні частинки залишкової фази, за рахунок чого збільшується міцність і твердість, а пластичність зменшується.

Відомо багато сплавів, здатних до старіння на основі Al, Mg, Cu, Ni, низковуглецевих сталей та ін. Взагалі старінню може підлягати довільний сплав, у якому є перенасичений твердий розчин. Такий розчин прагне до самовільного розпаду з виділенням з нього надлишку розчиненого компонента.

Режим старіння обирають, керуючись критерієм досягнення максимальної міцності (жароміцності) або оптимального поєднання міцності, пластичності та корозійної стійкості. Якщо при старінні на максимальну міцність (повне старіння) пластичність виявляється недопустимо низькою, то проводять неповне старіння, при якому втрата можливого приросту міцності компенсується деякою пластичністю.

Використовують наступні види старіння металів:

- *двоступінчасте старіння* (англ. *two-stage aging*) — старіння проводять спочатку при одній, а потім при іншій, зазвичай вищій температурі, для досягнення вищої щільності і однорідності розподілу виділень надлишкового компонента у матриці;
- *деформаційне старіння* (англ. *strain aging*) — старіння, що відбувається після або під час пластичного деформування у результаті взаємодії атомів домішок з дефектами кристалічної ґратки, що утворюються при пластичному деформуванні;
- *природне (низькотемпературне) старіння* (англ. *natural aging*) — старіння при вилежуванні за кімнатної температури. Спостерігається лише у сплавах з невисокою температурою плавлення, наприклад, в алюмінієвих сплавах, у яких при кімнатній температурі дифузійна рухливість атомів достатньо висока;
- *штучне (високотемпературне) старіння або дисперсійне зміцнення*^[1] (англ. *artificial aging*) — старіння при температурах, вищих за кімнатну; є основним видом зміцнювальної термічної обробки сплавів на основі кольорових металів;
- *магнітне старіння* (англ. *magnetic aging*) — зміна магнітних властивостей феромагнетика у часі. Магнітне старіння може спричинятись зміною доменної структури феромагнетика (оборотне магнітне старіння) або його кристалічної структури (необоротне магнітне старіння) під впливом магнітних полів, температурних чи механічних коливань тощо;

- *стабілізувальне старіння* (англ. *stabilizing aging*) — старіння при підвищених температурах з великими витримками; забезпечує стабілізацію властивостей та розмірів виробу;
- *старіння під напруженням* (англ. *stress aging*) — старіння у процесі якого напруження від зовнішнього навантаження впливає на форму, орієнтацію і взаємне розташування виділень надлишкового компонента. Використовують для підвищення границь пропорційності та пружності і релаксаційної стійкості (наприклад, при виготовленні пружних елементів з берилієвої бронзи).

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СПЛАВІВ АЛЮМІНІЮ (ЗАГАРТУВАННЯ на СТАРІННЯ)

Зміцнююча термічна обробка сплавів алюмінію складається з операцій загартування і старіння.

Вибір параметрів зміцнюючої термічної обробки містить:

При *загартуванні*:

- визначення температур нагрівання сплаву під загартування;
- визначення часу витримки при нагріванні;
- визначення критичної швидкості охолодження, що забезпечує отримання структури пересиченого твердого розчину.

При *старінні*:

- визначення температури старіння загартованого сплаву;
- визначення тривалості старіння загартованого сплаву для одержання потрібного рівня механічних властивостей.

Загартування в сплавах алюмінію один з видів фазових перетворень. При нагріванні інтерметалідні фази розчиняються в алюмінії, а при охолодженні знов виділяються з твердого розчину.

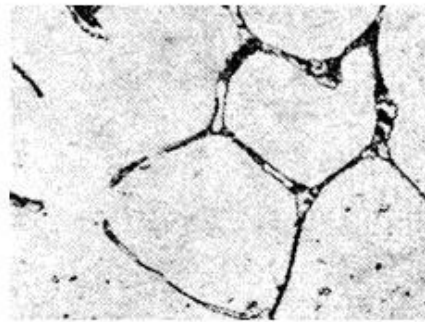
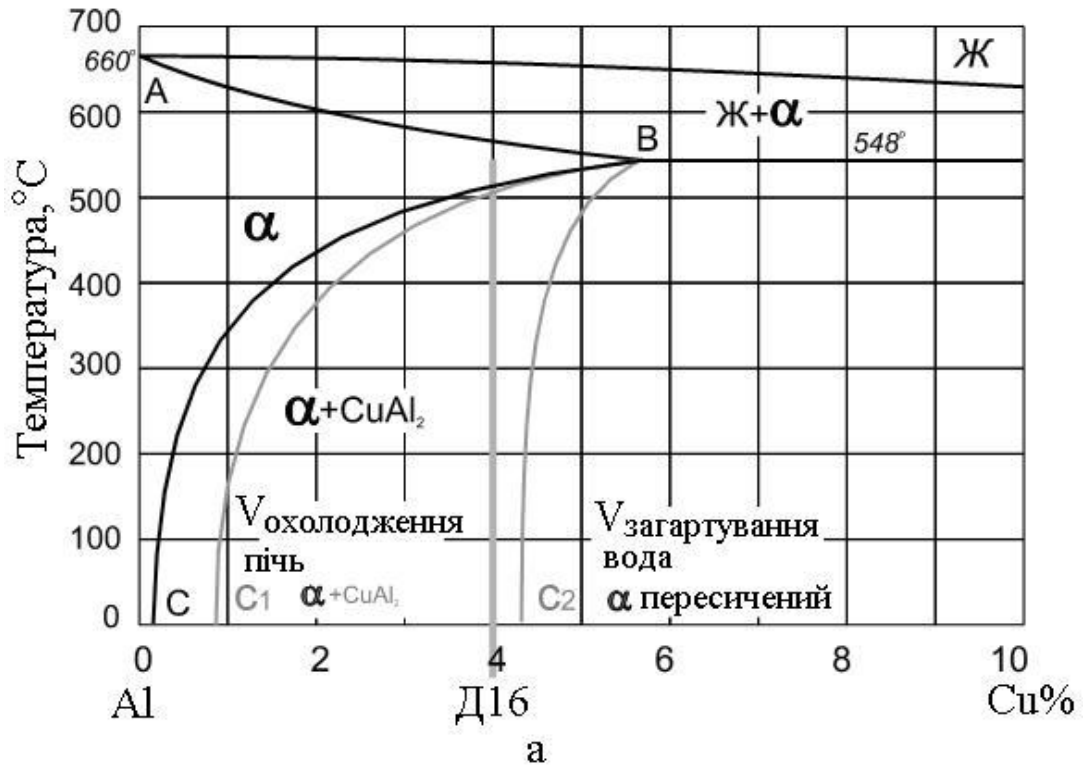
Загартування можливе для сплавів алюмінію, які містять легуючі елементи Cu, Mn, Si, Zn, Li, розчинність яких в твердому алюмінії змінюється з температурою. Елементи вводять до сплаву в кількостях, що перевищують розчинність в алюмінії при кімнатній температурі.

При збільшенні швидкості охолодження зменшується кількість інтерметалідних фаз, що виділяються. Утворюється пересичений твердий розчин легуючих елементів в алюмінії.

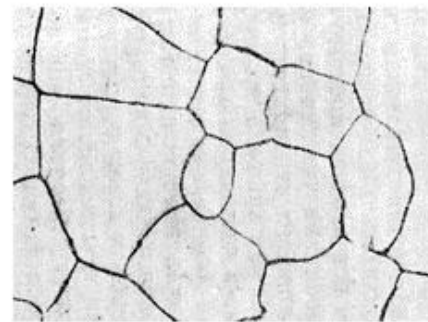
Мета загартування – одержати пересичений твердий розчин з максимальним вмістом легуючих елементів. Це забезпечує підвищення твердості та міцності в порівнянні з рівноважним станом, і дає можливість додаткового зміцнення при наступному старінні.

Визначення температур нагрівання сплаву під загартування

Дюралюміній марки Д16 містить 4%Cu; 0,5%Mg; 0,5%Mn. При загартуванні сплав Д16 нагрівають до температури вище лінії ВС, але нижче лінії солідуса АВ (рис.9) і витримують впродовж часу, необхідного для повного розчинення θ -фази Al_2Cu в алюмінії.



б



в

Рис. 9. Діаграма стану Al-Cu (а) і мікроструктура сплаву Д16, х400: вертикальна лінія відповідає змісту Cu в сплаві Д16;

показано зміну положення межі області вторинної кристалізації ВС при зміні швидкості охолодження сплаву Д16;

б – мікроструктура після охолодження з піччю; в – загартування в воді

Після загартування сплави мають підвищену в порівнянні з відпаленим станом міцність й зберігають високу пластичність. Подальше підвищення міцності відбувається при старінні.

Старіння – витримування загартованого сплаву при температурах, що відповідають проходженню підготовчих процесів і початкових стадій розпаду пересиченого твердого розчину.

Мета старіння – додаткове підвищення міцності загартованих сплавів. В таблиці 1 наведена зміна характеристик механічних властивостей сплаву Д16 після різних видів термічної обробки.

Пересичений твердий розчин загартованого сплаву термодинамічно нестабільний. Його розпад, що наближає фазовий стан до рівноважного, є процесом, що відбувається самовільно

Таблиця 1

Механічні властивості листів зі сплаву Д16

СТАН	Механічні властивості		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Після відпалу	200	100	25
Після загартування	300	220	23
Після загартування й старіння	450	340	18

Визначення температури старіння загартованого сплаву

У багатьох загартованих алюмінієвих сплавах підготовчі стадії та початок розпаду проходять без спеціального нагрівання під час вилежування деталей на складі. Витримку загартованих алюмінієвих сплавів при температурі навколишнього середовища називають *природним старінням*.

В деяких сплавах для підготовки до розпаду та проходження початкових його стадій потрібна термічна активація дифузійних процесів. Нагрівання загартованих алюмінієвих сплавів до $100\div 200^\circ\text{C}$ називають *штучним старінням*.

Визначення тривалості старіння загартованого сплаву для отримання необхідного рівня механічних властивостей.

Тривалість витримки при температурах старіння залежно від хімічного складу сплаву перебуває в межах від декількох годин до декількох десятків годин.

Процес розпаду пересиченого твердого розчину сплаву Д16 по мірі підвищення температури нагрівання і збільшення тривалості витримки відбувається за наступною схемою:

I. В твердому розчині утворюються субмікроскопічні області – *зони Гінґе-Престона (ГП)* з підвищеним вмістом міді. Стала гратки зон ГП менше, ніж у твердого розчину, тому що атомний радіус Cu менше, ніж в Al. Зони ГП мають пластинчасту форму і утворюються на кристалографічних площинах (100). Товщина зон $0,5\div 1,0$ нм, діаметр зон $4\div 10$ нм. Зони ГП не спостерігаються у

світловому, не завжди спостерігаються в електронному мікроскопі. Їх виявляють спеціальними методами рентгеноструктурного аналізу.

II. Утворюються виділення *проміжної* θ'' -фази, склад якої відповідає Al_2Cu . Фаза θ'' з тетрагональною ґраткою, що різниться від матриці повністю когерентна з α -алюмінієвим твердим розчином і не має границі розділу з матрицею. В θ'' -фазі впорядковане взаємне розташування атомів міді й алюмінію, частина площин зайнята тільки атомами Cu, а частина тільки атомами Al. Максимальна товщина виділень θ'' -фази 10 нм, діаметр до 150 нм.

III. θ'' -фаза перетворюється в частково когерентні частки *проміжної* θ' -фази, зі складом, відповідним до рівноважної θ -фази Al_2Cu . Ґратка θ' -фази відрізняється, як від ґратки алюмінію, так і від ґратки θ'' -фази. Вона сполучена когерентно із ґраткою алюмінію по площинах (100) і не повністю відділена від матриці поверхнею розподілу. Не всі утворення θ'' -фази перетворюються в частки θ' -фази, частина їх розчиняється в матриці. Можливе утворення часток θ' -фази безпосередньо із твердого розчину.

IV. Утворення стабільної θ -фази Al_2Cu , когерентність ґраток матриці й фази, що виділяється, повністю порушується (рис.10).

V. Відбувається коагуляція θ -фази Al_2Cu .

Розподіл процесу розпаду на наведені вище стадії умовний. У сплаві одночасно можуть бути зони ГП і θ'' -фаза; θ'' - і θ' -фази; θ' - і θ -фази.

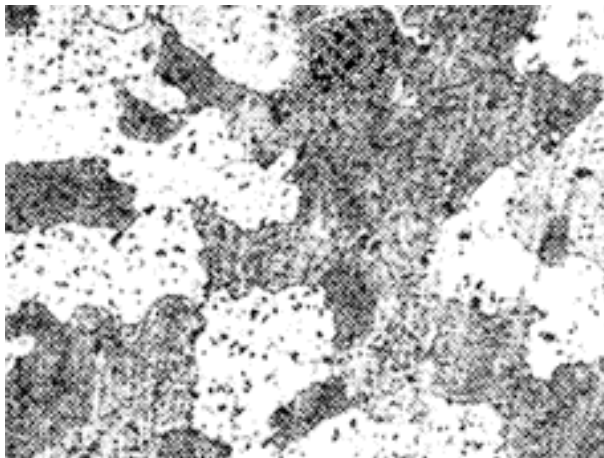


Рис. 3.5. Мікроструктура сплаву Д16, частки θ -фази, $\times 400$

При *природному старінні* утворюються зони ГП. При *штучному старінні* з нагріванням до 200°C утворюється θ' -фаза. Утворення часток стабільної θ -фази та їх коагуляція відбуваються під час відпалу при температурах $300\div 400^\circ\text{C}$.

Схема розпаду пересиченого твердого розчину справедлива й для інших термічно зміцнюваних сплавів Al, але в них будуть різні за хімічним складом й властивостям зміцнюючі фази:

Al-Cu: $\alpha \rightarrow$ зони ГП $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$ (Al_2Cu);

Al-Cu-Mg: $\alpha \rightarrow$ зони ГП $\rightarrow \text{S}'' \rightarrow \text{S}' \rightarrow \text{S}$ (Al_2CuMg);

Al-Zn-Mg: $\alpha \rightarrow$ зони ГП $\rightarrow \eta' \rightarrow \eta \rightarrow T$ ($Al_2Mg_3Zn_3$);

Al-Mg-Si: $\alpha \rightarrow \beta'' \rightarrow \beta$ (Mg_2Si);

Al-Li: $\alpha \rightarrow \delta'$ (Al_3Li) $\rightarrow \delta$ ($AlLi$).

Зміни структури алюмінієвих сплавів при розпаді пересичених твердих розчинів впливають на властивості. В сплаві Д16 утворення зон ГП, виділення проміжних метастабільних θ'' -фаз й θ' -фаз викликають зростання міцності. Утворення і коагуляція стабільної θ -фази обумовлює зниження міцності.

Зони ГП і метастабільні частки θ'' -фаз й θ' -фаз у сплаві Д16 є перешкодою для руху дислокацій.

При пластичній деформації дислокації, що рухаються, перерізують зони ГП. Спотворення ґратки при когерентному стикуванні фаз, упорядковане розташування зон ГП у матриці підвищують напруги, необхідні для руху дислокацій, тобто межі плинності.

Інтерметалідні частки θ'' -фаз й θ' -фаз з кристалічними ґратками, які відмінні від матриці, й упорядкованим розташуванням атомів більш серйозна перешкода для руху дислокацій, дислокації не перерізують, а обходять ці частки. При зменшенні відстані між частками зростають напруги, необхідні для вигину дислокацій та їхнього проходження між частками, що призводить до підвищення межі плинності.

Максимальний ефект зміцнення досягається, коли після старіння утворюються дисперсні, напівкогерентні, рівномірно розподілені в матриці на невеликих відстанях інтерметалідні частки. Укрупнення часток та збільшення відстаней між ними призводить до зниження міцності. Температура старіння на максимальну міцність $125 \div 200^\circ C$. Тривалість старіння $8 \div 12$ годин. Характер зміни тимчасового опору руйнуванню сплаву Д16 залежно від температури й тривалості старіння наведено на рис. 11.

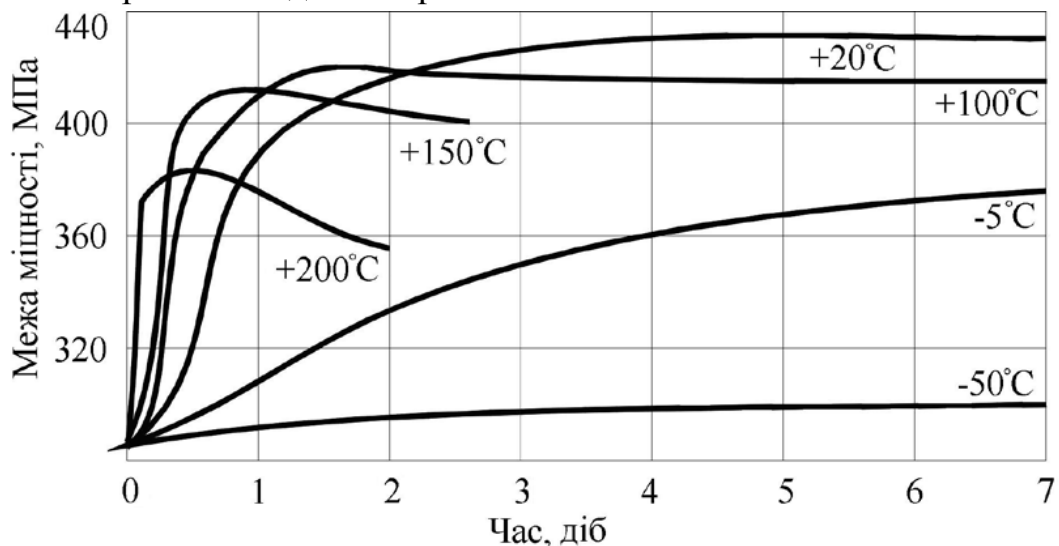


Рис. 10 Вплив температури й тривалості старіння на тимчасовий опір руйнуванню сплаву Д16; цифри біля кривих позначають температуру старіння сплаву

Використана література

1. Гуляев А.П., *Металловедение.*, Москва, *Металлургия*, 1986
2. Захаров А.М. *Диаграммы состояния двойных и тройных систем.* ., Москва, *Металлургия* 1978. 293с.
3. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов.* 3-е издание, переработанное и дополненное. Москва, *Металлургия*, 1983, 366 с.
4. Таран Ю.М., Калінушкін С.П., Куцова В.З., Погребна Н.Е., Спірідонова І.М., Хохлова Т.О., Носко О.А. *Металознавство та термічна обробка металів і сплавів в застосуваннях комп'ютерних технологій навчання.* Частина 2, Дн-вск, *Дніпркнига*, 2002, 260 с.
5. Бунин К.П., Баранов А.А., *Металлография*, 1971.
6. Новиков И.И. и др. *Металловедение, термообработка и рентгенография*, 1994
7. Бунин К.П., Баранов Ф.Ф., Таран Ю.Н. *Фазовые равновесия и кристаллизация металлических сплавов*, 1973, Днепропетровск, 133стр.
8. Вишняков Д. Я., Пигузов Ю. В., Лэйн-Цюань.— *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1961, 1, 143.
9. Вишняков Д. Я., Ольховой Л. С.— *Металловедение и обработка металлов*, 1957, 9.
10. В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. *Методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство»/ Дніпропетровськ, ДВНЗ УДХТУ, 2014, 36с.*

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яким чином маркуються вуглецеві сталі.
2. Розшифруйте марку сталі У11.
3. Як змінюються структура і властивості металів при холодному деформуванні?
4. Поясніть термін «деформаційний наклеп».
5. Як змінюються структура і властивості металів при нагріві після холодного деформування?
6. Що собою являє термін «первинна» рекристалізація?
7. Що собою являє термін «вторинна» рекристалізація?
8. При яких умовах відбувається «динамічна» рекристалізація?
9. Які процеси відбуваються у структурі холоднодеформованого металу при нагріві нижче температури рекристалізації?
10. При яких умовах відбувається знеміцнення металу після холодного деформування?
11. Яким чином обробку тиском металів поділяють на гарячу, холодну та теплу?
12. Як змінюється структура та властивості металів при гарячому деформуванні?
13. Що собою являють діаграми рекристалізації для різних металів та сплавів?
14. Поясніть за рахунок яких процесів у структурі металів після холодного деформування відбувається зниження пластичності.
15. Що собою являє поліморфне перетворення?
16. За якими механізмами відбуваються поліморфні перетворення в металах або неметалах?
17. Які чинники впливають на механізми поліморфних перетворень?
18. Назвіть широковідомі поліморфні метали та неметали.
19. При яких умовах відбувається мартенситне перетворення?
20. Як механізм поліморфного перетворення впливає на властивості металів?
21. Як змінюються властивості сплаву після охолодження при поліморфному перетворенні з швидкістю більшою за критичну?
22. За якими механізмами відбуваються поліморфні перетворення у сплавах?
23. Охарактеризуйте, мартенситне та проміжне перетворення в сплавах.
24. За яких умов може відбуватися евтоктоїдне перетворення в сплавах?

25. Яким чином форма кристалів надлишкових фаз та розташування у структурі впливають на властивості сплаву?
26. Яким чином відбувається розпад пересичених твердих розчинів. Опишіть процес старіння?
27. З яких причин відбувається процес старіння в сплавах?
28. Як стадії попередвиділення при старінні можуть впливати на властивості матеріалів?
29. Які бувають види старіння сплавів?
30. Яким чином структурні зміни при старінні впливають на властивості сплавів?
31. Поясніть термін «перестарювання».