

Odpuszczanie (tempering)

- Nagrzewanie zahartowanej stali (o strukturze martenzytycznej) celem zwiększenia jej plastyczności
- Podczas nagrzewania występuje wydzielanie węglików i **zdrowienie** struktury dyslokacyjnej

Zdrowienie to wszystkie procesy anihilacji defektów poza przemieszczeniem się granic szerokokątowych (granice o kącie dezorientacji $>15^\circ$)

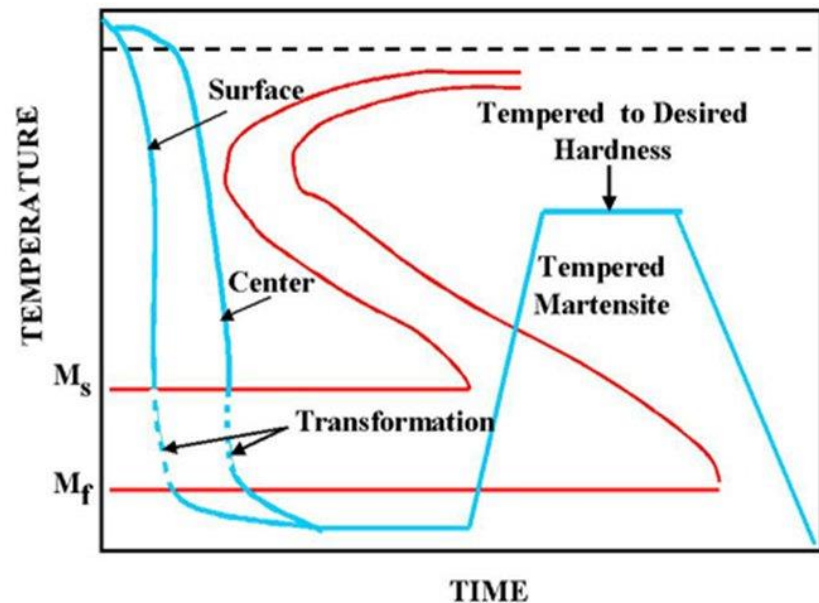
W czasie zdrowienia następuje anihilacja wakansji oraz przemieszczanie się dyslokacji, które tworzą wąskokątowe granice podziaren (granice o kącie dezorientacji $< 15^\circ$)

Podczas zdrowienia następuje częściowe uwolnienie zmagazynowanej energii odkształcenia.

Odpuszczanie

- Odpuszczanie uprzednio zahartowanej stali polega na jej nagraniu do temperatury nieprzekraczającej A_1 , wygrzaniu w czasie od 30 minut do kilku godzin a następnie oziębieniu.
- Operacja ta jest stosowana w celu zmiany struktury i właściwości materiału (poprawa ciągliwości i zmniejszenia kruchości kosztem obniżenia twardości) oraz usunięcia występujących po hartowaniu naprężeń własnych.

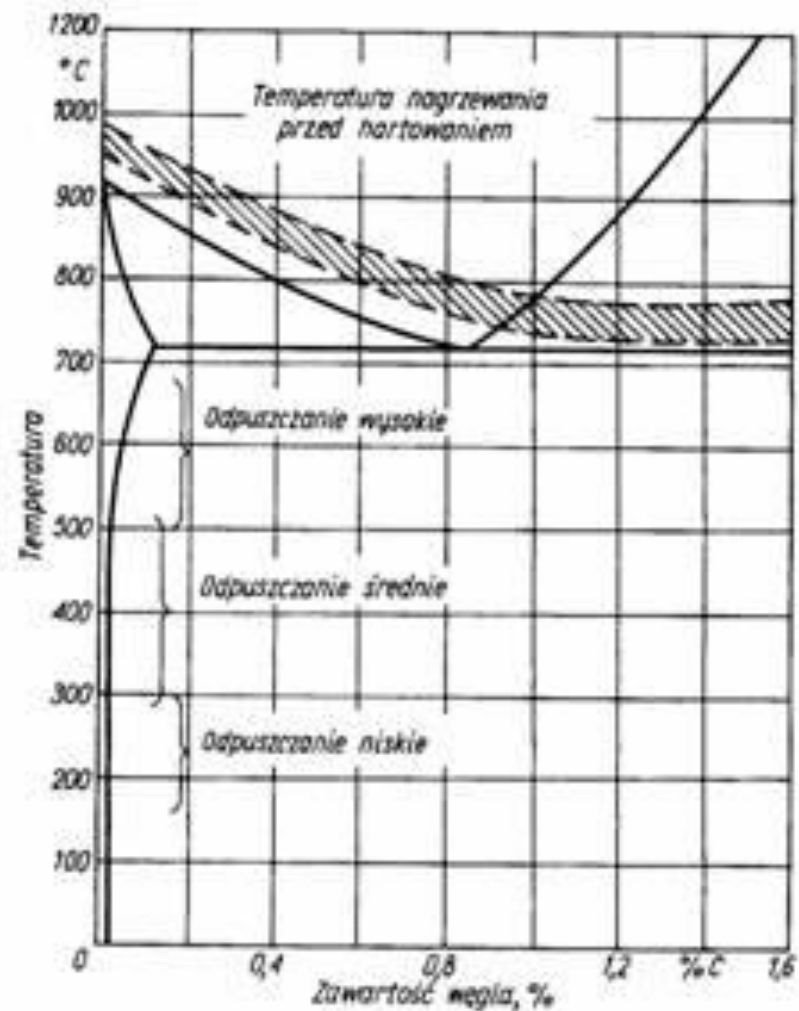
CONVENTIONAL QUENCHING AND TEMPERING



Podczas odpuszczania martenzyt jako przesycony roztwór stały podlega przemianom zależnym od temperatury.

- W zakresie **80 - 250°C** wydziela się nadmiar węgla w postaci węglika ϵ o składzie zmiennym od Fe_2C do $\text{Fe}_{2,3}\text{C}$. Rezultatem jest stopniowy zanik tetragonalności sieci martenzytu oraz związanych z tym naprężeń. Od **150°C** węgiel ϵ jest zastępowany przez Fe_3C . Wynikiem powyższych przemian jest **struktura złożona z częściowo przesyconego ferrytu oraz z submikroskopowych wydzielen węglika ϵ i cementytu**, zwana martenzytem odpuszczonym.
- Jednocześnie wskutek zmniejszenia naprężeń ściskających austenit szczątkowy (jeżeli jest) ulega przemianie w martenzyt odpuszczony.
- W temperaturze około **400°C** otrzymujemy mieszaninę nieprzesyconego ferrytu i Fe_3C .
- W zakresie temperatury **od 400°C do około 650°C** wydzielenia cementytu przyjmują postać kulistą, a ich wymiary ulegają zwiększeniu. Przemiany te prowadzą do utworzenia struktury dwufazowej, zwanej sorbitem będącej mieszaniną ferrytu i Fe_3C o dyspersji zmniejszającej się ze wzrostem temperatury.
- Strukturę uzyskaną przez wygrzewanie w temperaturze około 700°C nazywamy sferoidytem (cementytem kulkowym na tle ferrytu).

- **odpuszczanie niskie** - w zakresie temperatury **150- 250°C**; zmniejsza naprężenia hartownicze przy zachowaniu najwyższej twardości i odporności na ścieranie,
- **odpuszczanie średnie** - w zakresie temperatury **250 - 500°C**; ma na celu uzyskanie jak najwyższej granicy sprężystości, wytrzymałości zmęczeniowej wytrzymałości na rozciąganie przy zadawalającej plastyczności (sprężyny, resory),
- **odpuszczanie wysokie** - pomiędzy temperaturami **500°C i A_1** w celu uzyskania optymalnego kompleksu właściwości mechanicznych, tj. dużych wartości R_m i R_e .
- Operacja hartowania i wysokiego odpuszczania nosi nazwę **ulepszania cieplnego**



Dodatki stopowe (szczególnie Cr, Mo, Si) opóźniają proces rozkładu martenzytu.

Aby uzyskać taki sam efekt odpuszczania dla stali stopowej, należy podwyższyć temperaturę odpuszczania lub znacznie wydłużyć czas wygrzewania.

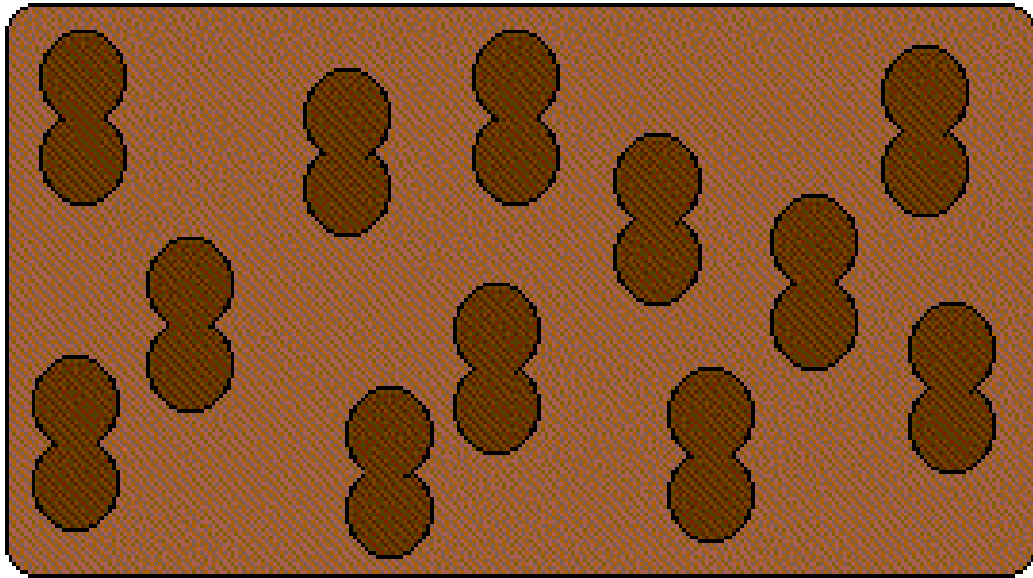
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

- 1. Występująca w stopie faza ciągła stanowiąca znaczną jego objętość to osnowa**
- 2. Tworzące się w osnowie cząstki innej fazy to wydzielenia**
- 3. Umocnić wydzieleniowo można tylko takie stopy, które:**
 - a) w stanie stałym w wysokiej temperaturze mają strukturę jednofazową, natomiast w niskiej temperaturze mają strukturę dwufazową**
 - b) przy małych szybkościach chłodzenia można uzyskać roztwór przesycony**

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

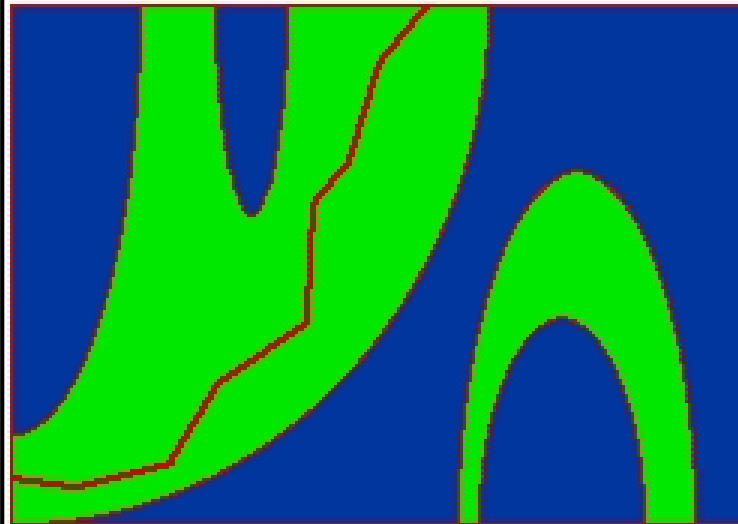
Warunki jakie powinny spełniać osnowa i wydzielenia umacniające:

1. Osnowa powinna być miękka i ciągliwa, natomiast wydzielenia – twarde;
2. Twarde wydzielenia nie powinny tworzyć ciągłej warstwy po granicach ziaren osnowy (powstałe w takich wydzieleniach pęknięcie może szybko rozprzestrzenić się przez cały materiał, powodując jego zniszczenie);
3. Częstki wydzieleni powinny być drobne o dużej gęstości, równomiernie rozmieszczone w objętości stopu i przynajmniej częściowo koherentne;
4. Częstki wydzieleni nie powinny mieć ostrych krawędzi, gdyż wówczas sprzyjają zarodkowaniu pęknięć.

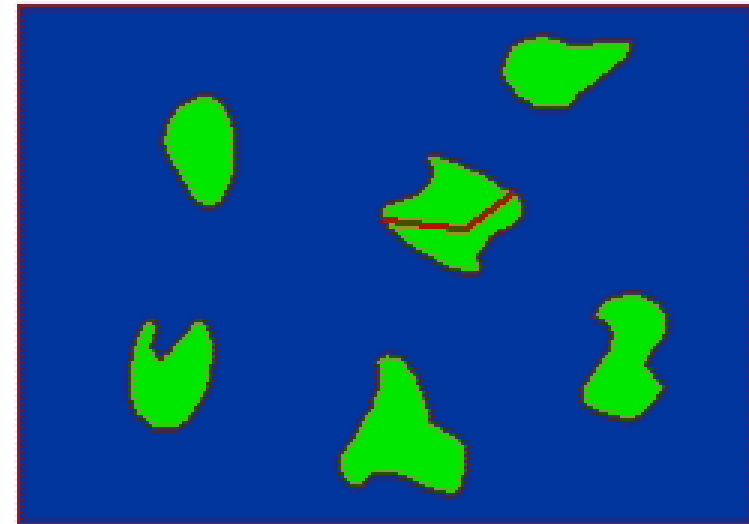


Miękka, ciągliwa matryca z drobnymi, twardymi wydzieleniami

Drobne, twarde wydzielenia. Wtedy pęknięcia wewnątrz wydzieleni nie propagują przez cały materiał, ale są blokowane przez osnowę.



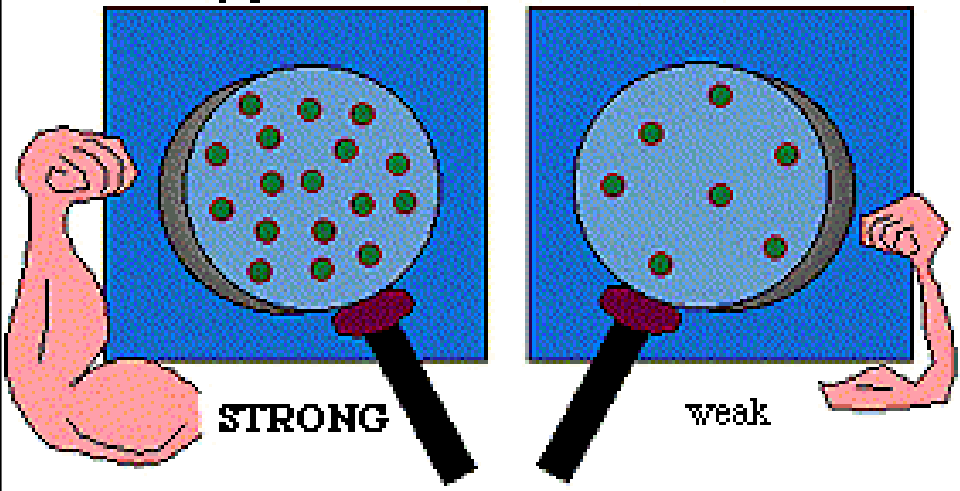
Soft matrix Crack Continuous precipitate



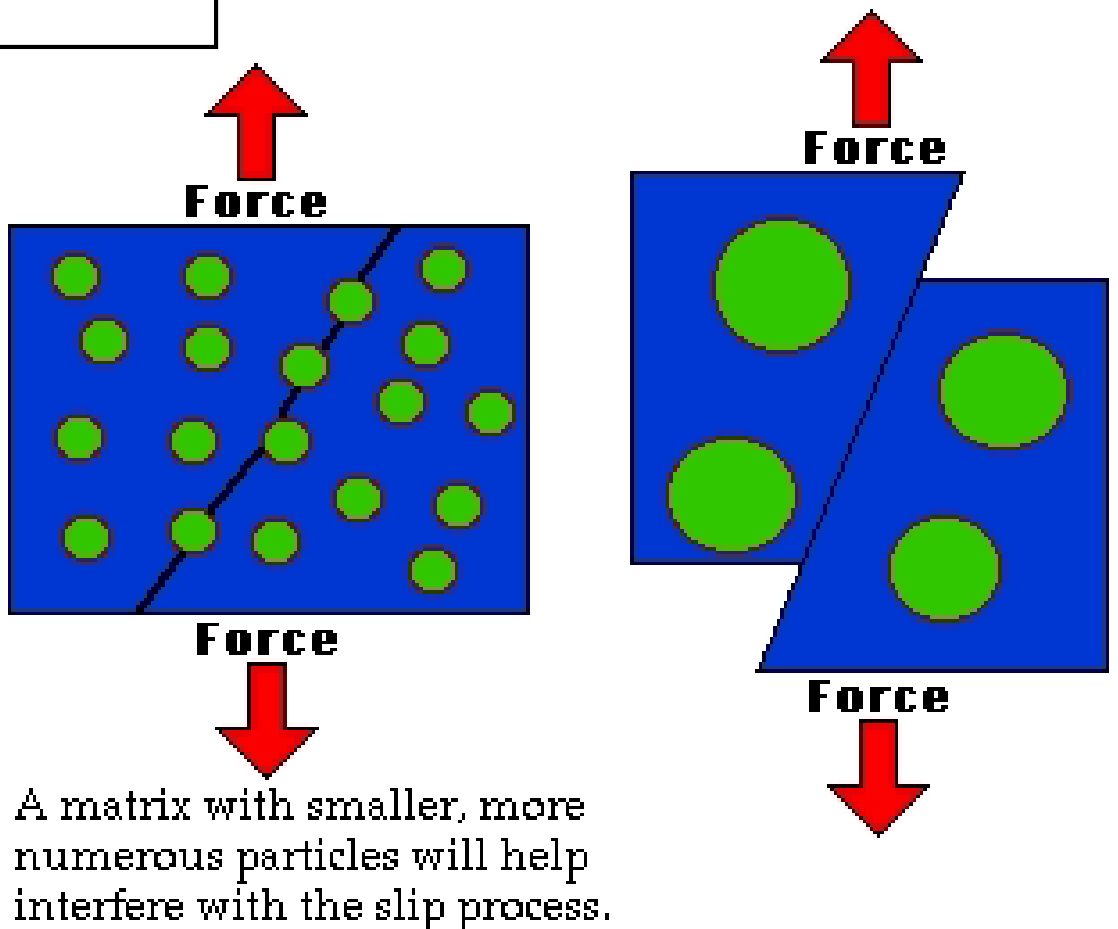
Soft matrix Crack Discontinuous precipitate

Many particulates

Few Particulates

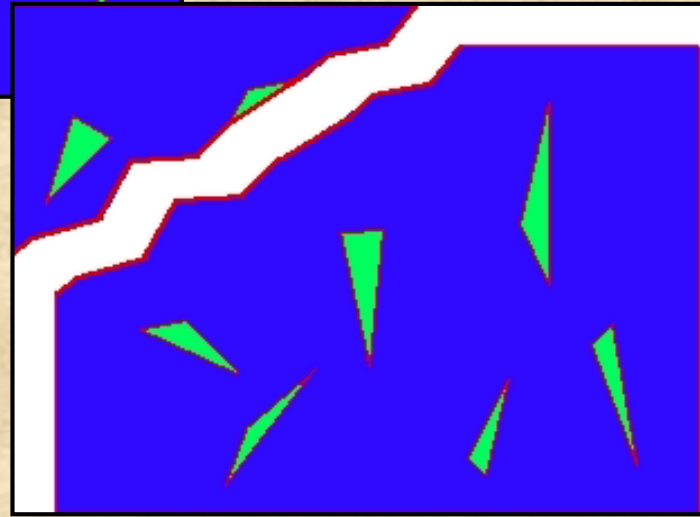
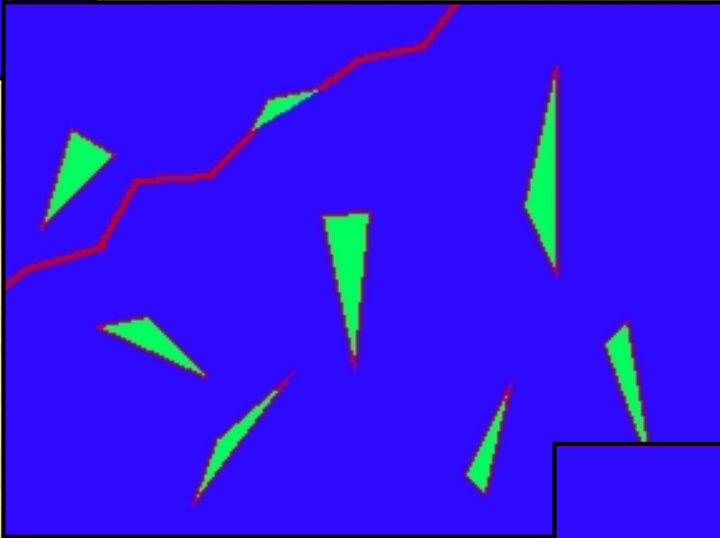
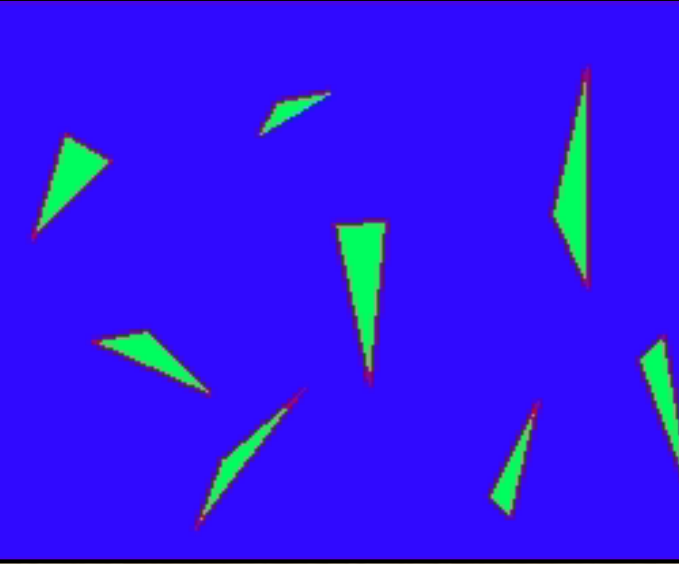


Liczne, drobne cząstki wydzieleń blokują poślizg w materiale.

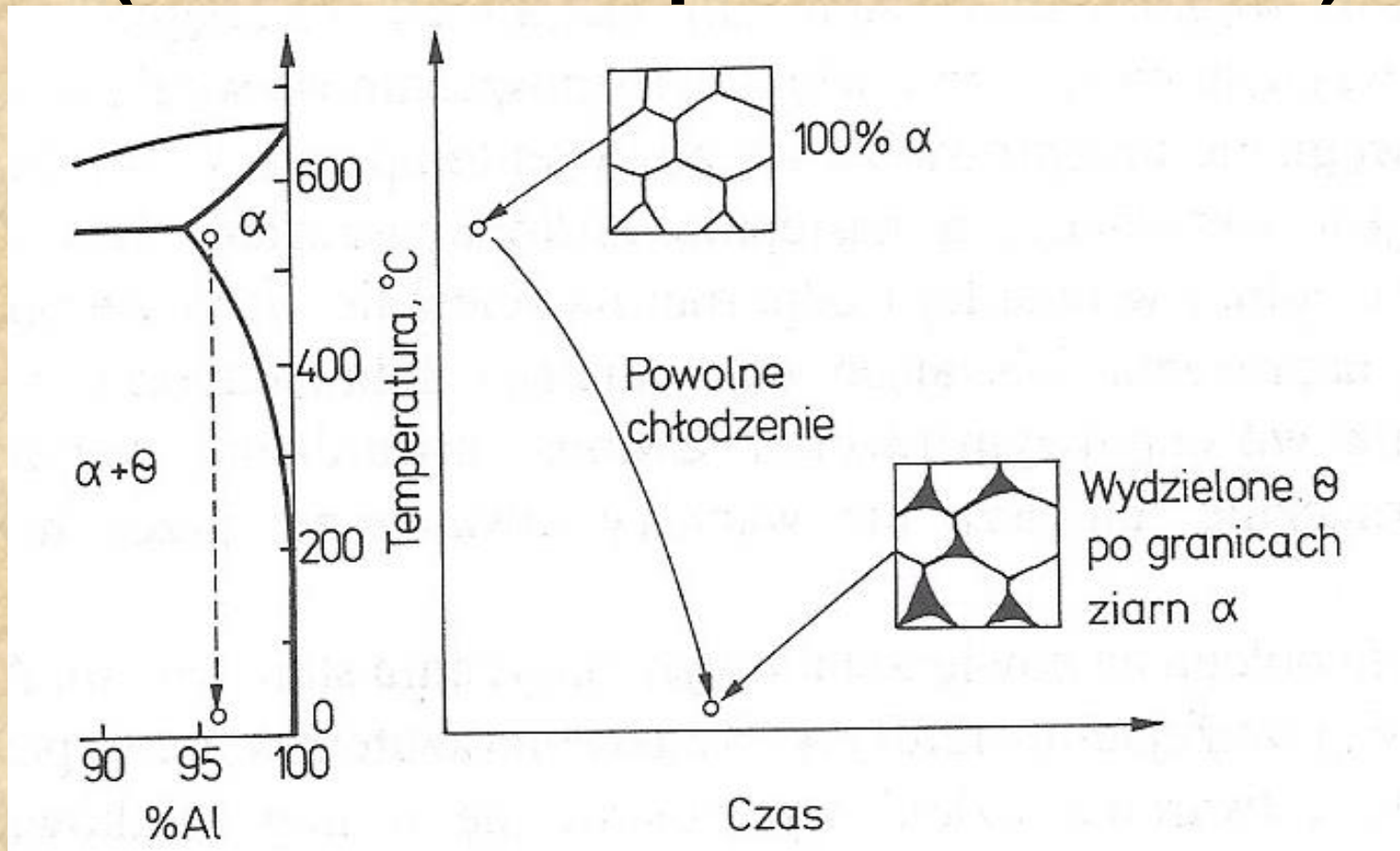


A matrix with smaller, more numerous particles will help interfere with the slip process.

**Okrągłe cząstki są lepsze od
cząstek podłużnych, które sprzyjają
katastroficznemu pękaniu.**



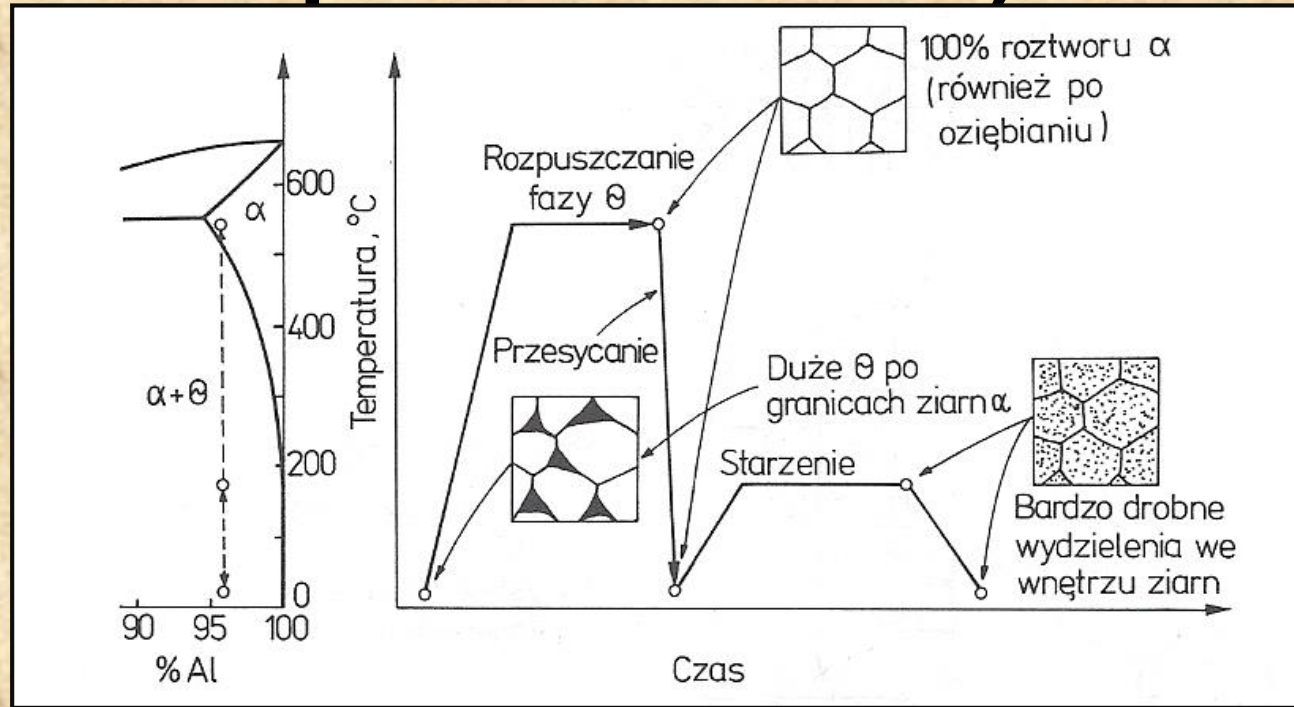
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Powolne chłodzenie stopu AlCu₄ z zakresu jednofazowego do temperatury otoczenia powoduje tworzenie się dużych wydzielań fazy θ (CuAl₂) na granicach fazy α

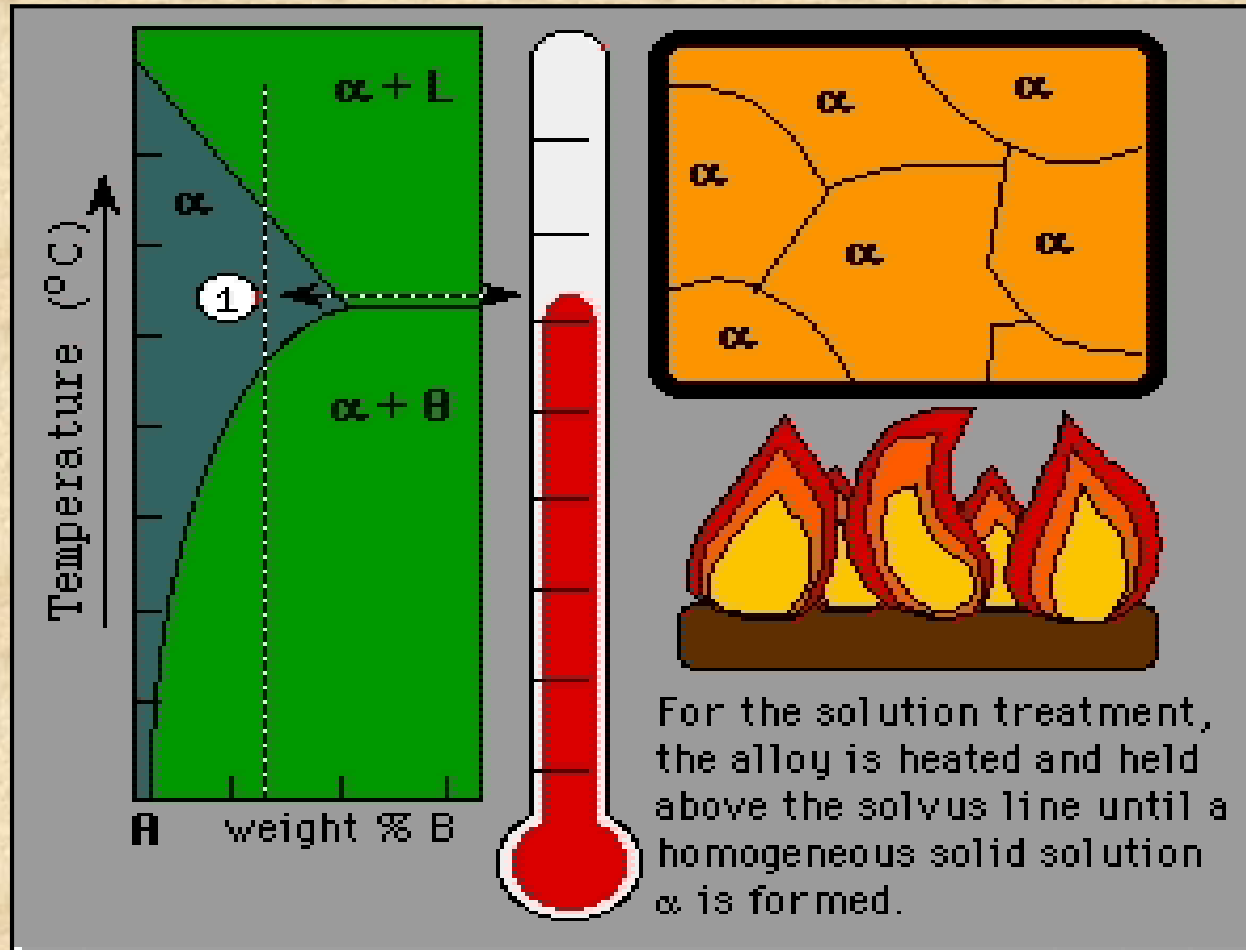
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

Schemat obróbki
cieplnej
prowadzącej do
umocnienia
wydzieleniowego
stopu $AlCu_4$

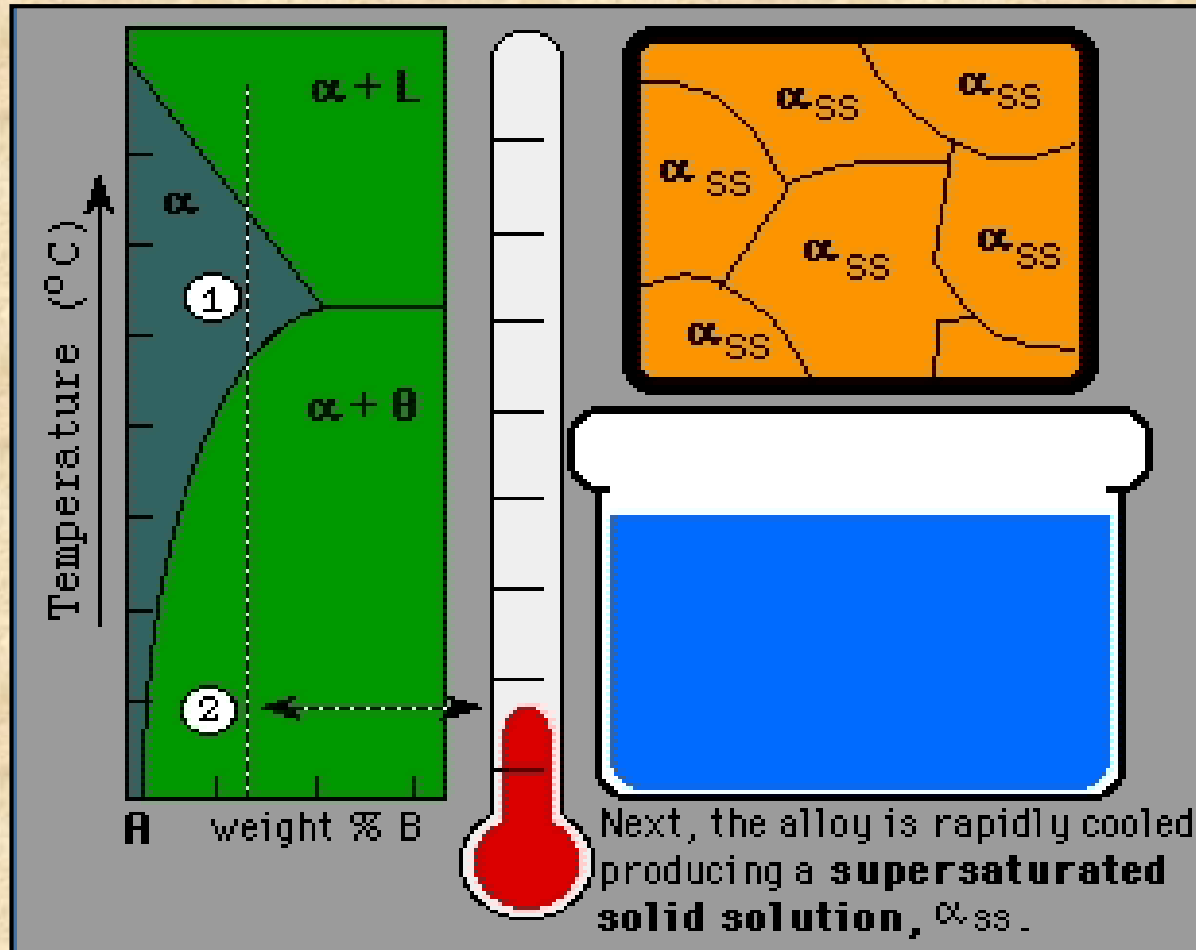


- 1) **Rozpuszczanie** – stop nagrzewamy do zakresu roztworu α i wytrzymujemy w celu rozpuszczenia cząstek θ
- 2) **Oziębianie (przesycanie)** – stop jest oziębiany z szybkością zapewniającą zatrzymanie atomów Cu w roztworze (przesycanie)
- 3) **Starzenie** – wytrzymywanie stopu w temperaturze otoczenia (*starzenie naturalne/samorzutne*) lub w podwyższonej temperaturze (*starzenie przyspieszone/sztuczne*) w celu doprowadzenia do utworzenia wydzielań w przesyconym roztworze.

Step 1: Solution Treatment

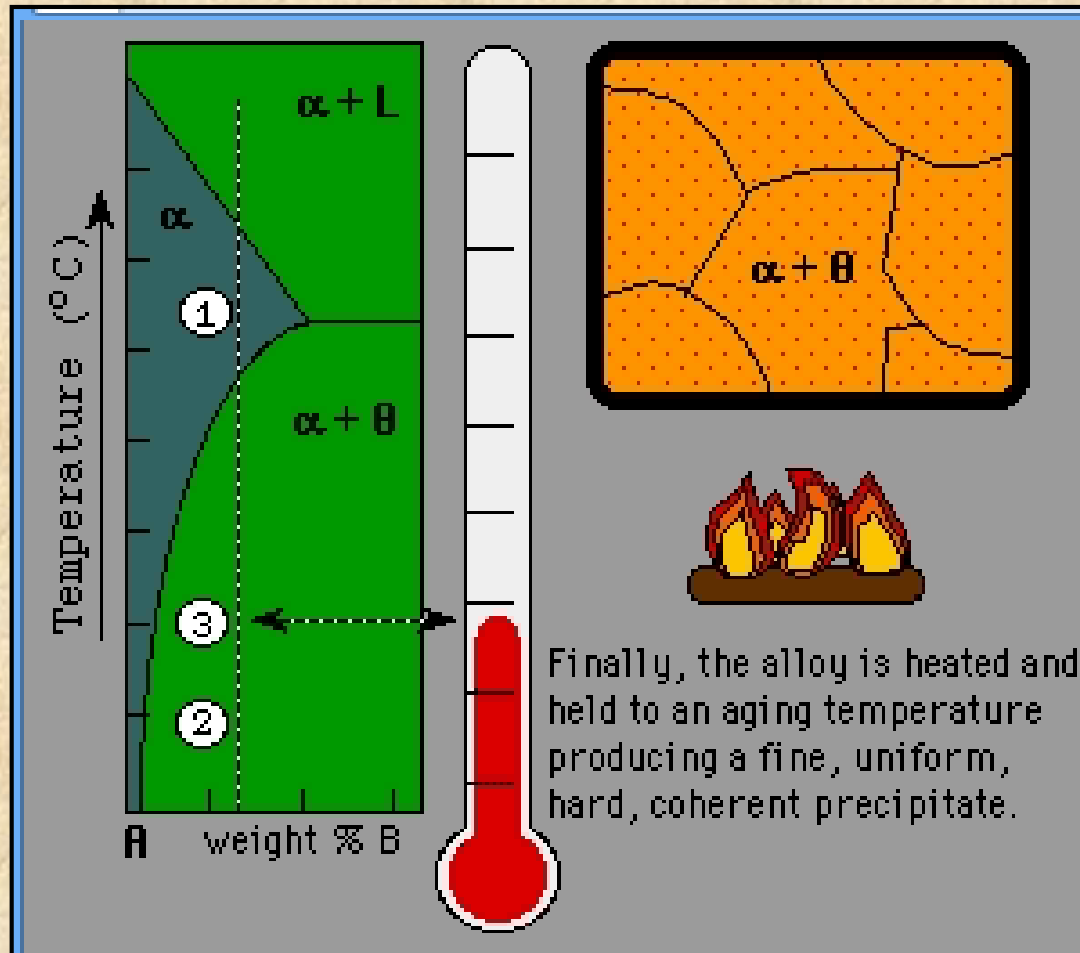


Step 2: Quench



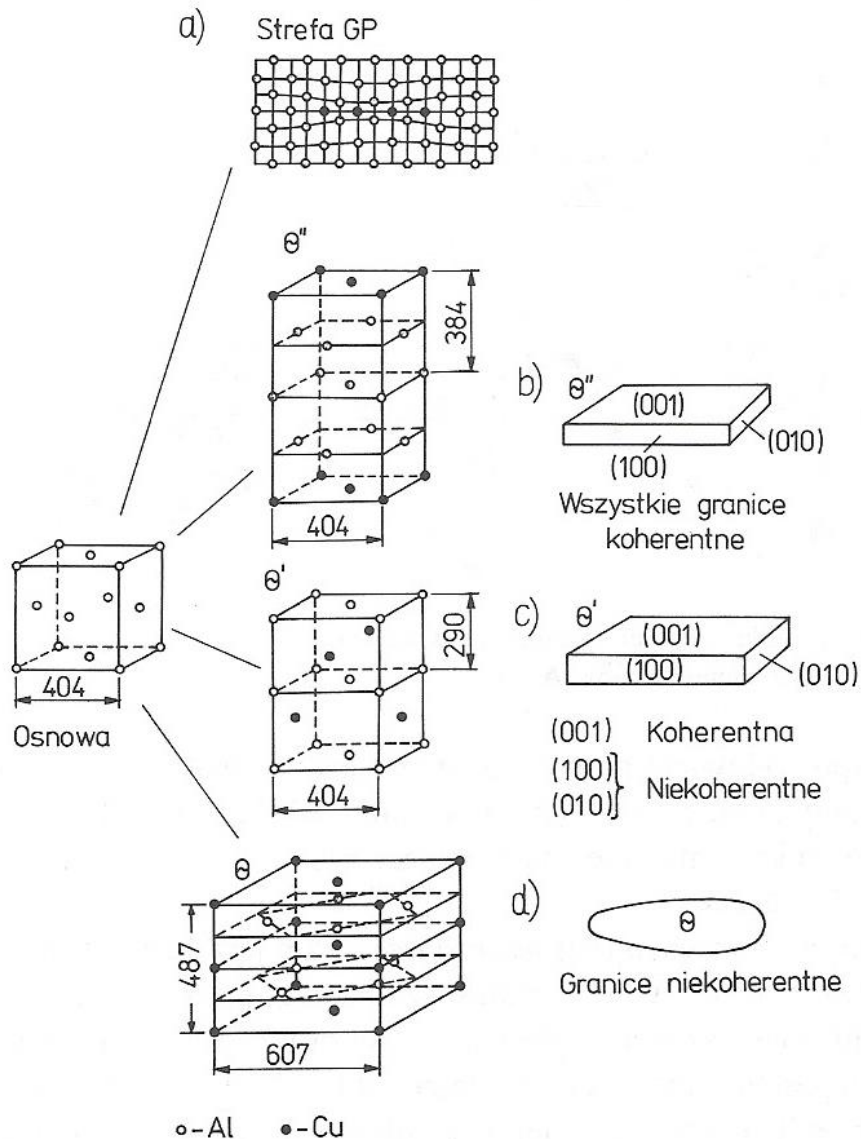
This is not an equilibrium structure!!!

Step 3: Aging



The supersaturated alloy is now heated again **below** the solvus line to allow the excess atoms to diffuse to numerous nucleation sites in order to form a fine and well dispersed precipitate of the phase.

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Tworzące się fazy metastabilne i faza stabilna podczas starzenia stopu AlCu_4

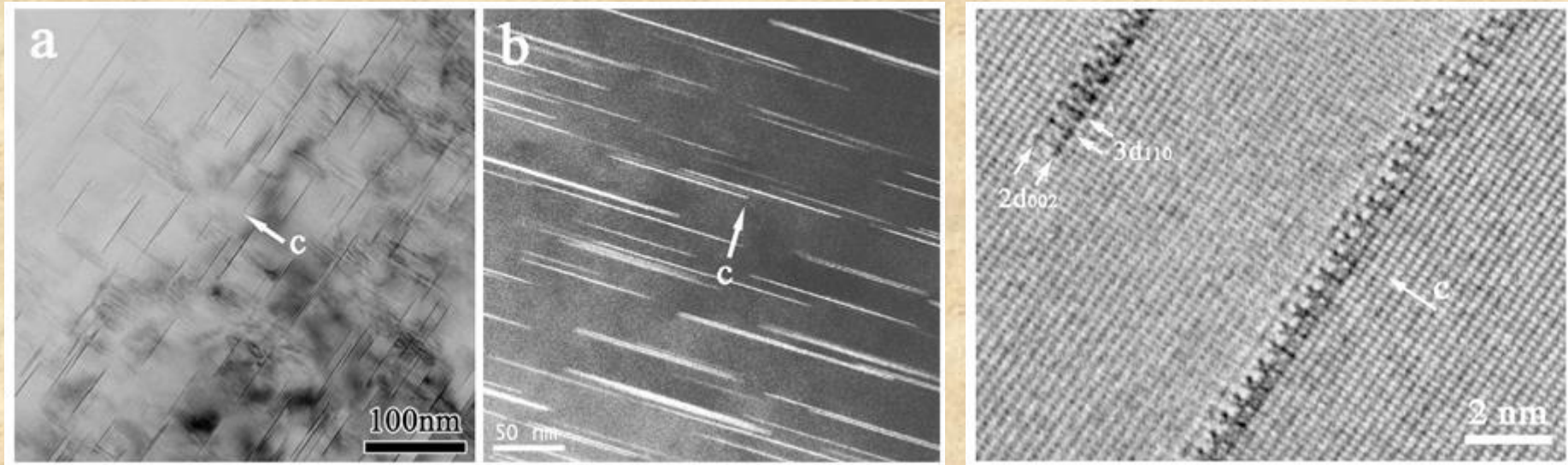
a) **Strefy Guinier-Prestona (GP)** zarodkują jednorodnie w przesyconej osnowie, mają kształt dysku i są w pełni koherentne z osnową; zachowaniu koherencji w obszarach krawędzi towarzyszą duże odkształcenia sprężyste;

b) **Wydzielenia θ''** powstają przez przemianę *in situ* niektórych stref GP, mają kształt płytek i są koherentne z osnową;

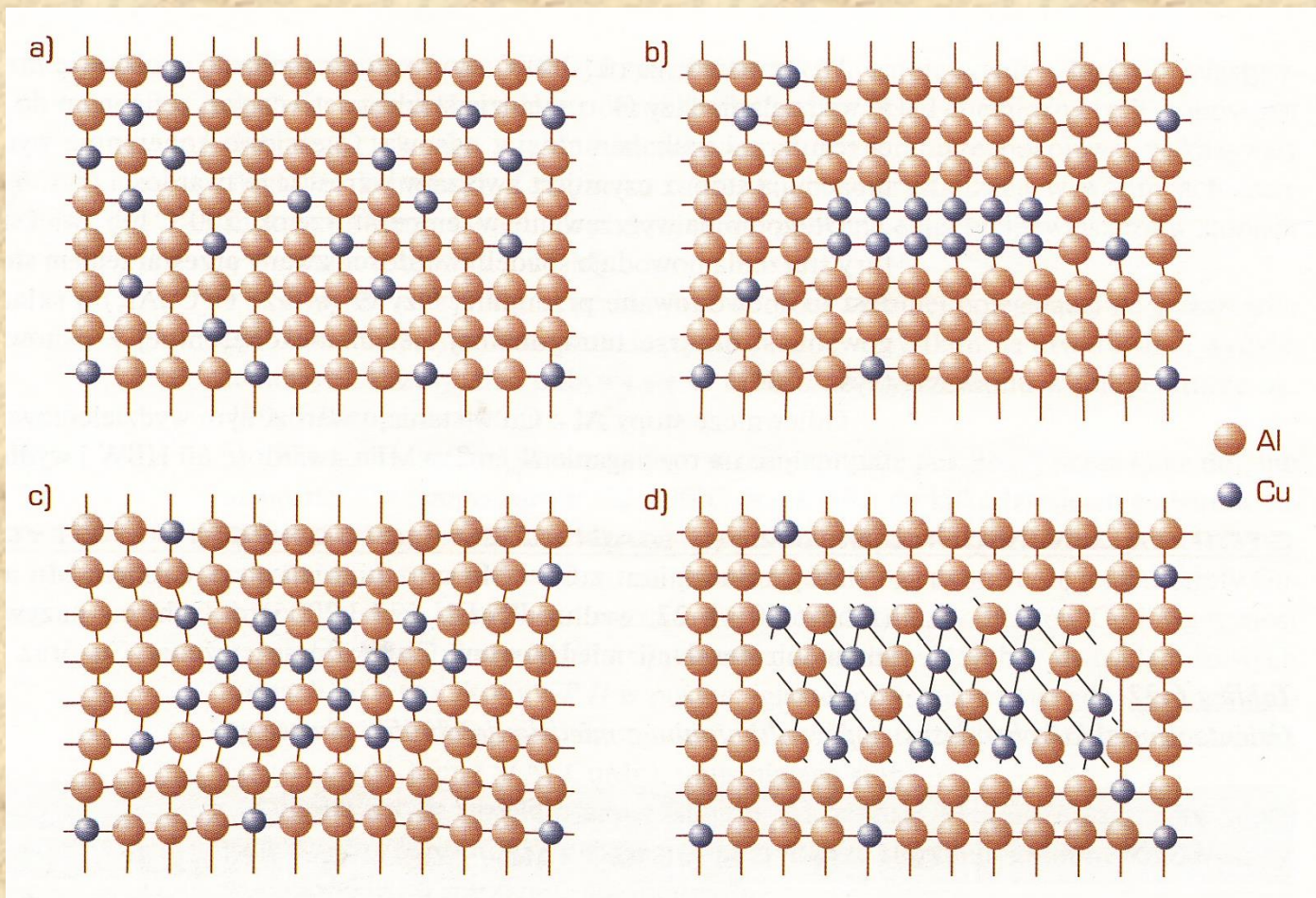
c) **Wydzielenia θ'** zarodkują na dyslokacjach, mają kształt płytek; płaskie powierzchnie są koherentne z osnową, krawędzie - nie;

d) **Wydzielenia θ** są niekoherentne z osnową, zarodkują na granicach ziaren i na granicach międzyfazowych osnowa/wydzielenie θ'' (wymiary w ppm).

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

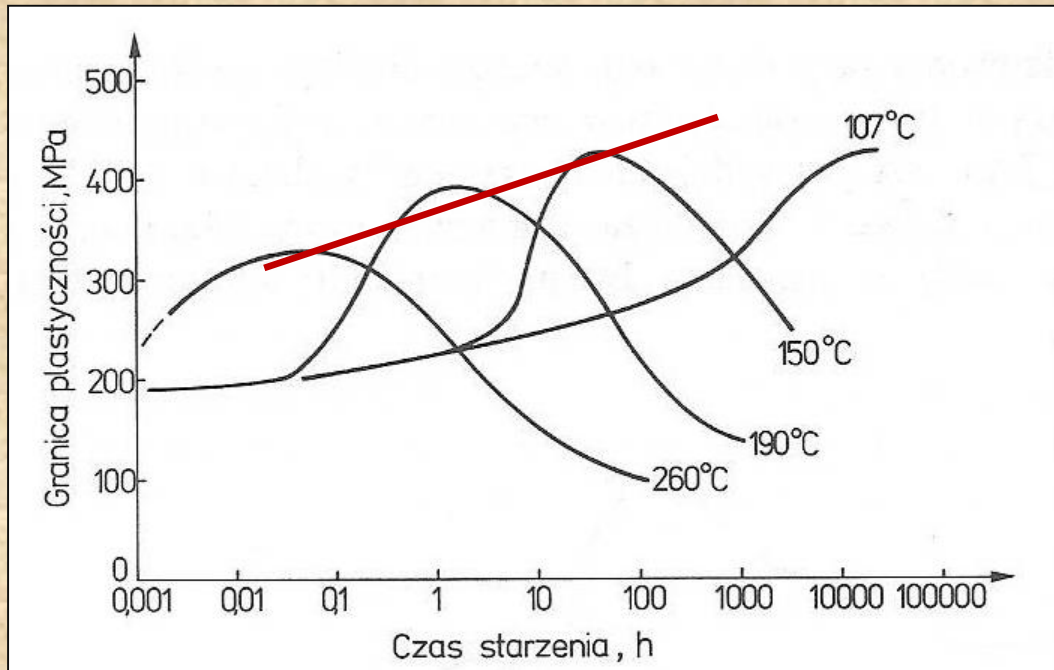


Strefy Guinier-Prestona w stopie Mg-Gd-Zn



Schemat kolejnych stadiów starzenia stopu AlCu₄: a) roztwór stały α , b) strefa GP; c) faza przejściowa koherentna θ' , d) faza równowagowa θ

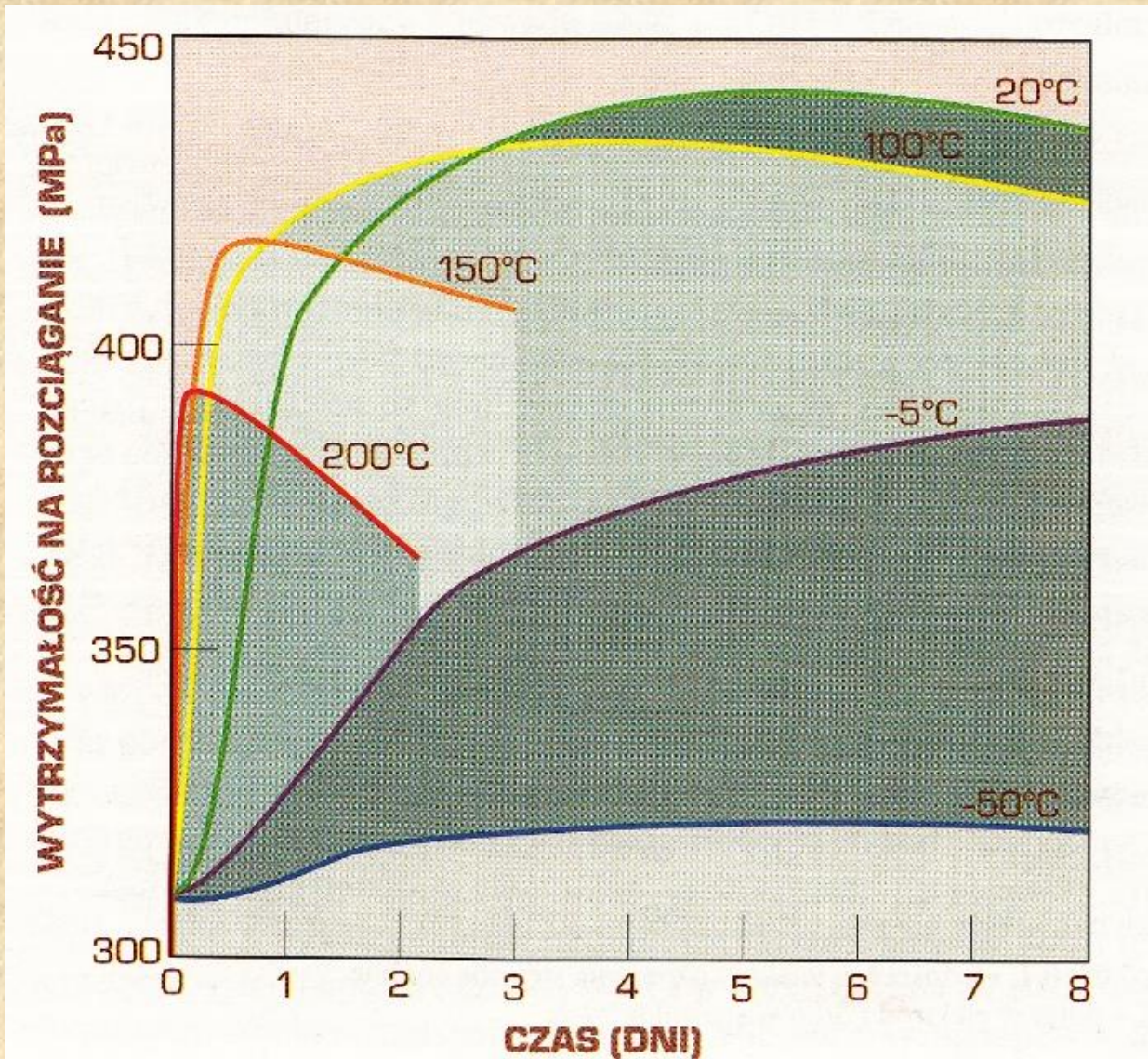
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Granica plastyczności przesyconego stopu AlCu4 w zależności od czasu starzenia w różnych temperaturach

Z obniżaniem temperatury starzenia wzrasta czas potrzebny do uzyskania maksymalnej wytrzymałości.

Starzenie w niskich temperaturach jest korzystne, gdyż uzyskuje się wtedy większą wytrzymałość. Uzyskane właściwości są bardziej jednorodne.



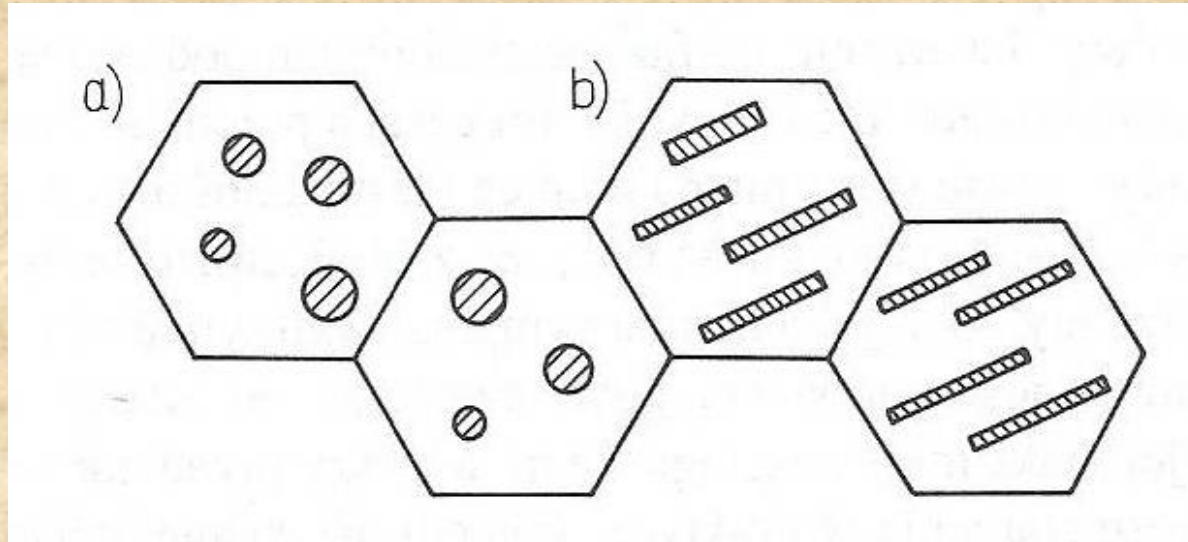
Wpływ temperatury i czasu starzenia na twardość stopu AlCu4

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

Ogólne zasady dotyczące wydzielania się faz z przesyconych roztworów stałych:

- 1. Strefy GP i fazy koherentne zarodkują jednorodnie w osnowie.**
- 2. Uprzywilejowanymi miejscami zarodkowania częściowo koherentnych faz są dyslokacje, zaś faz niekoherentnych - granice ziaren.**
- 3. Jeżeli niskoenergetyczna granica faz osnowa/wydzielenie może występować TYLKO PRZY JEDNEJ ORIENTACJI granicy, to wydzielenia mają kształt cienkich płytek lub dysków.**
- 4. Wydzielenia niekoherentne charakteryzują się tym, iż energia granicy międzyfazowej nie zależy od orientacji granicy i ich kształt jest w przybliżeniu kulisty. Przy takim kształcie energia powierzchniowa jest minimalna (kula ma najmniejszy stosunek powierzchni do objętości).**

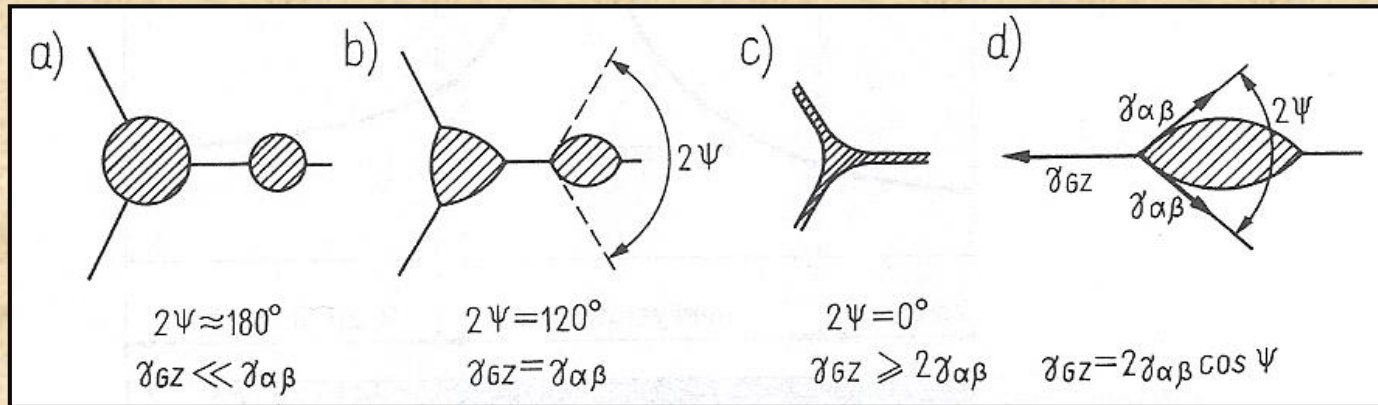
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Kształty cząstek innej fazy we wnętrzu ziaren osnowy są zależne od energii granicy międzyfazowej:

- Jeżeli energia granicy międzyfazowej **NIE ZALEŻY** od orientacji granicy, to **cząstki wydzielenia są kuliste**
- Jeżeli granica niskoenergetyczna istnieje tylko w jednej orientacji granicy międzyfazowej, to **cząstki wydzielenia mają kształt płytek**

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Równowagowe kształty cząstek drugiej fazy na liniach styku granic ziaren i na powierzchni granic zależne od wartości kąta 2ψ . Linie styku granic ziaren i powierzchnie granic ziaren są prostopadłe do ekranu.

Kształt równowagowy wydzieleni na granicach ziaren (przy założeniu że energia granic ziaren NIE ZALEŻY od orientacji) jest warunkowany relacją pomiędzy energią granicy ziaren γ_{GZ} i energią granicy międzyfazowej $\gamma_{\alpha\beta}$.

Jeżeli $\gamma_{GZ} \approx 2 \gamma_{\alpha\beta}$ to faza wydzielająca może utworzyć ciągłą warstwę wzdłuż granic ziaren.

Jeżeli ta warstwa jest twarda i krucha to również stop jest kruchy.