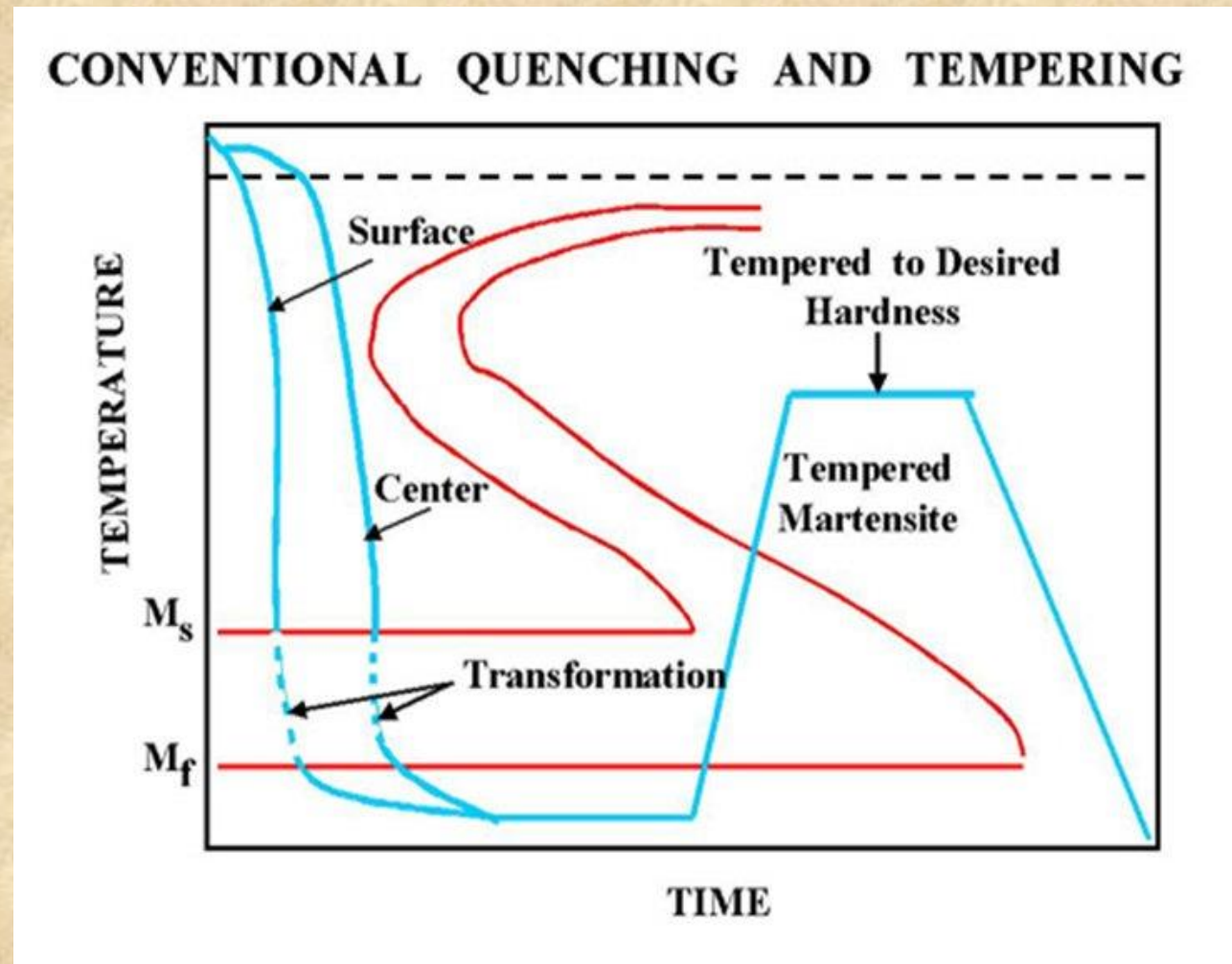


Wykład V

Odpuszczanie (tempering)

- Jest to nagrzewanie zahartowanej stali (o strukturze martenzytycznej) celem zwiększenia jej plastyczności.
- Odpuszczanie uprzednio zahartowanej stali polega na jej nagrzaniu do temperatury nieprzekraczającej A_1 , wygrzaniu w czasie od 30 minut do kilku godzin i oziębieniu.
- Operacja ta jest stosowana w celu zmiany struktury i właściwości materiału dla poprawy ciągliwości i zmniejszenia kruchości kosztem obniżenia twardości oraz usunięcia występujących po hartowaniu naprężeń własnych.
- Podczas nagrzewania występuje wydzielanie węglików i zdrowienie struktury dyslokacyjnej.



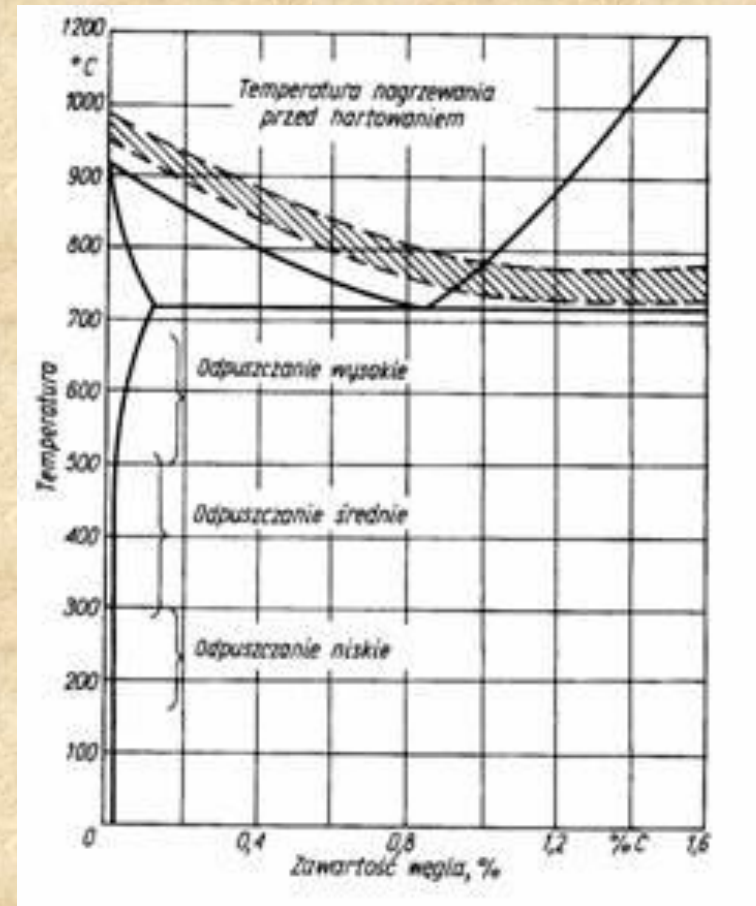
Podczas odpuszczania martenzyt jako przesycony roztwór stały podlega przemianom zależnym od temperatury.

- **80 - 250°C** wydziela się nadmiar węgla w postaci węglika ϵ o składzie zmiennym od Fe_2C do $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$. Rezultatem jest stopniowy zanik tetragonalności sieci martenzytu oraz związanych z tym naprężeń.
- **Od 150°C** węglik ϵ jest zastępowany przez Fe_3C . Wynikiem powyższych przemian jest **struktura złożona z częściowo przesyconego ferrytu oraz z submikroskopowych wydzieleni węglika ϵ i cementytu**, zwana **martenzytem odpuszczonym**.
Jednocześnie na skutek zaniku tetragonalności martenzytu i zmniejszenia naprężeń ściskających, austenit szczątkowy (jeżeli jest) ulega przemianie w martenzyt odpuszczony.
- **400°C** otrzymujemy mieszaninę nieprzesyconego ferrytu i Fe_3C .
- **400°C - 650°C** wydzielena 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.
- **700°C** struktura uzyskana w tej temperaturze to **sferoidyt** (cementyt kulkowy na tle ferrytu).

- **odpuszczanie niskie** - w zakresie temperatur do 250°C w czasie 1 - 3 h przy chłodzeniu z dowolną szybkością; stosowane do części maszyn, od których wymaga się dużej twardości przy możliwie małych naprężeniach własnych;

- **odpuszczanie średnie** - w zakresie temperatur 250 - 500°C; po odpuszczaniu w temperaturze powyżej 400 - 500°C uzyskuje się wysoką granicę sprężystości przy dostatecznej plastyczności (sprężyny, resory);

- **odpuszczanie wysokie** - pomiędzy temperaturą 500°C i A_1 w czasie 2 - 3 h przy chłodzeniu powolnym lub przyspieszonym; stosowane do stali konstrukcyjnych w celu uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych, tj. dużych wartości R_m (wytrzymałość na rozciąganie) i R_e (granica plastyczności) przy dobrej plastyczności.



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.

Charakterystyka przemian dyfuzyjnych

Podsumowanie

- Atomy przemieszczają się na odległość rzędu od 1 do 10^6 odległości międzyatomowych;
- Atomy przemieszczają się z miejsca na miejsce w wyniku dyfuzji aktywowanej cieplnie;
- Atomy „przeskakują” przypadkowo z miejsce na miejsce jednak więcej przeskakuje „do przodu” niż do „tyłu”;
- Szybkość przemiany zależy silnie od temperatury, przemiana nie zachodzi poniżej $0.3T_E$ do $0.4T_E$;
- Stopień przemiany zależy zarówno od **czasu** jak i od **temperatury**;
- W stopach wskutek dyfuzji jest możliwa zmiana składu poszczególnych faz;
- Zależności krystalograficzne pomiędzy fazami występują sporadycznie.

Charakterystyka przemian bezdyfuzyjnych

Podsumowanie

- Atomy przemieszczają się na odległość $\leq$ niż odległości międzyatomowe;
- Atomy przemieszczają się zrywając i odnawiając wiązania międzyatomowe z niewielką zmianą pozycji;
- Atomy przemieszczają się jeden za drugim w precyzyjnej kolejności;
- Szybkość przemiany $\cong$ szybkość rozchodzenia się drgań w sieci kryształowej (niezależna od temperatury); przemiana może zajść nawet w temp. 4 K;
- Stopień przemiany (objętość, która uległa przemianie) zależy od temperatury i składu chemicznego wyjściowej fazy;
- Nie zachodzi zmiana składu chemicznego (atomy nie mają czasu na dyfuzję – zostają tam gdzie były!);
- **Zawsze** występują specyficzne zależności krystalograficzne pomiędzy fazą macierzystą a produktem reakcji.

Umocnienie metali

Umocnienie roztworowe (poprzez tworzenie roztworu stałego)

Wewnętrzne pola naprężeń wokół rozpuszczonych atomów oddziałują wzajemnie z polami naprężeń dyslokacji

Umocnienie granicami ziaren (poprzez rozdrobnienie ziaren)

Granice ziaren jako blokady na drodze poruszających się dyslokacji

Utwardzenie dyspersyjne

Wewnętrzne pola naprężeń od cząstek dyspersyjnych oddziałują z polami naprężeń wokół dyslokacji

Utwardzenie wydzieleniowe

Wydzielenia w osnowie matrycy działają jako blokady na drodze poruszających się dyslokacji

Umocnienie odkształceniowe (dyslokacyjne)

Unieruchomione dyslokacje blokują ruch poruszającym się dyslokacjom

Umocnienie poprzez przemianę martenzytyczną (hartowanie)

Wykorzystanie przemian fazowych do otrzymywania drobnych, silnie odkształconych składników mikrostruktury

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

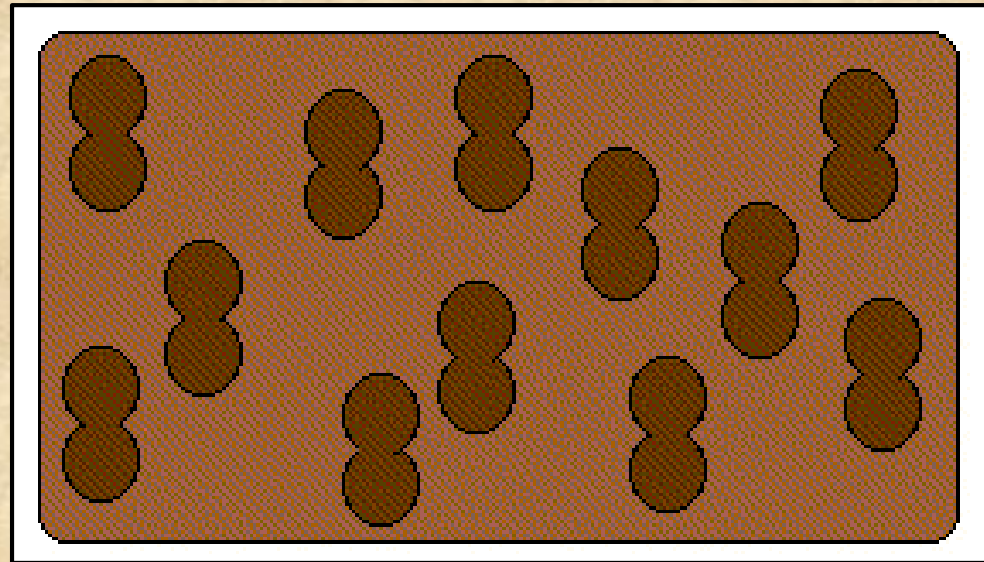
1. Występująca w stopie faza ciągła stanowiąca znaczna jego objętość to osnowa
2. Tworzące się w osnowie cząstki innej fazy to wydzielenia
3. Umacniać wydzieleniowo można tylko takie stopy, które:
 - a) w stanie stałym w wysokiej temperaturze mają strukturę jednofazową, natomiast w niskiej temperaturze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

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

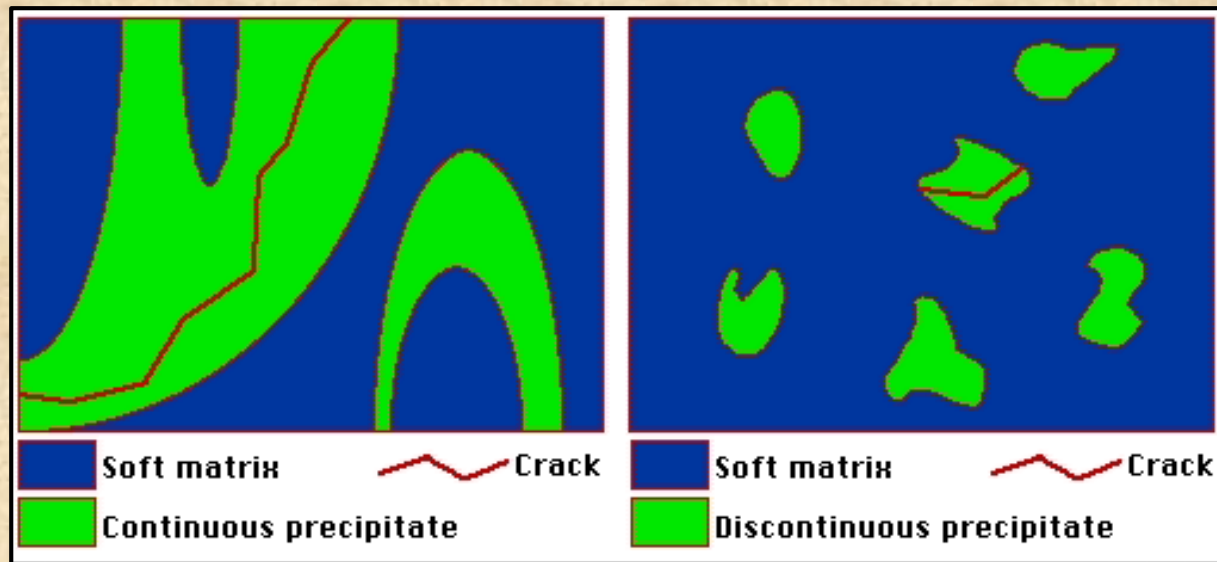
Warunki jakie powinny spełniać osnowa i wydzielena umacniające:

1. Osnowa powinna być miękka i ciągliwa, natomiast wydzielena – twarde;
2. Twarde wydzielena nie powinny tworzyć ciągłej błonki 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.

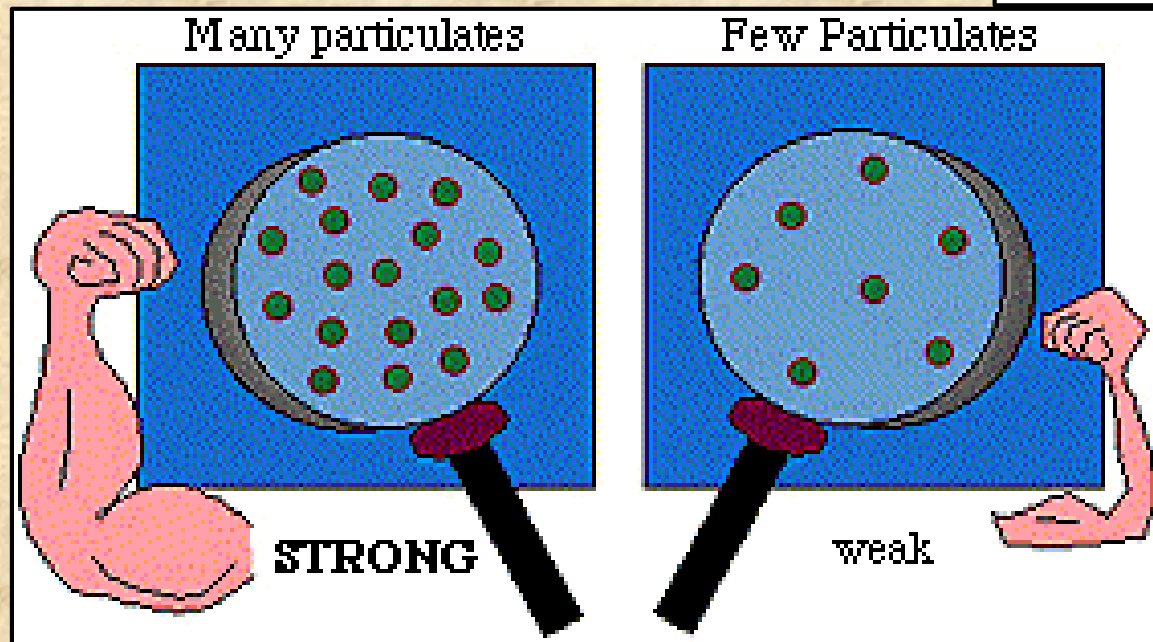
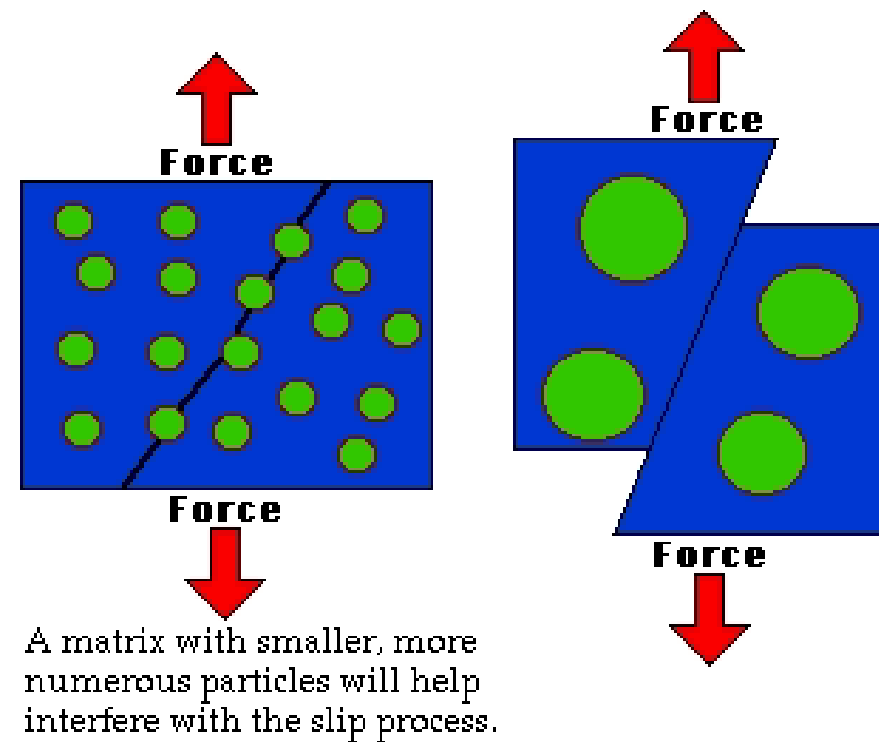
**Miękka, ciągliwa
matryca z drobnymi,
twardymi
wydzieleniami**



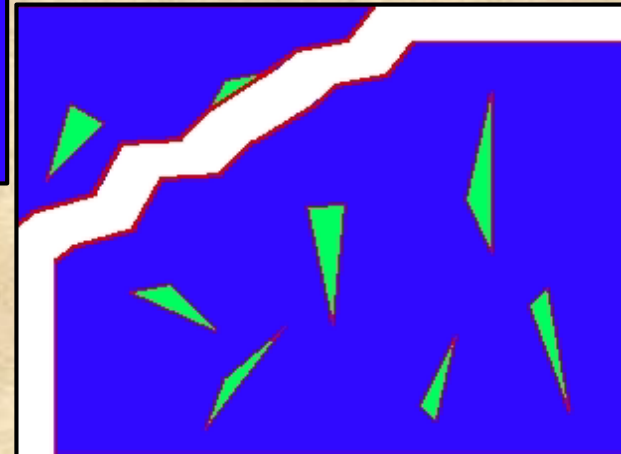
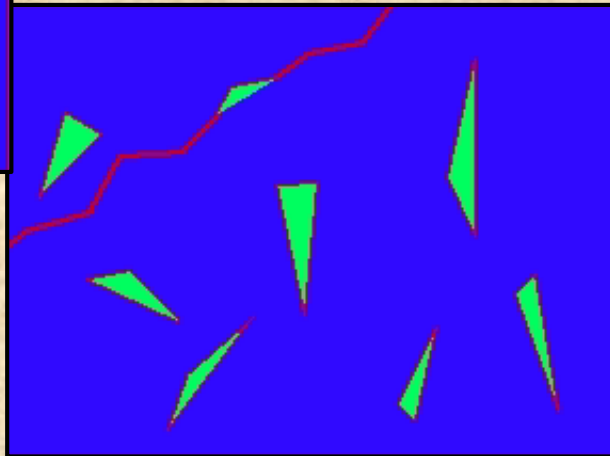
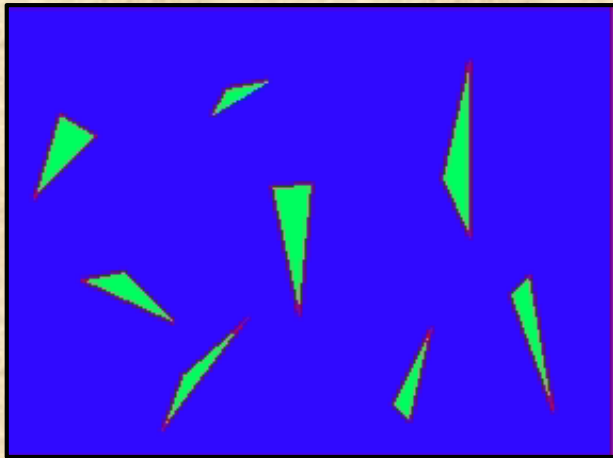
**Drobne, twarde
wydzielenia. Wtedy
pęknięcia wewnątrz
wydzieleni nie propagują
przez cały materiał, ale są
blokowane przez
osnowę.**



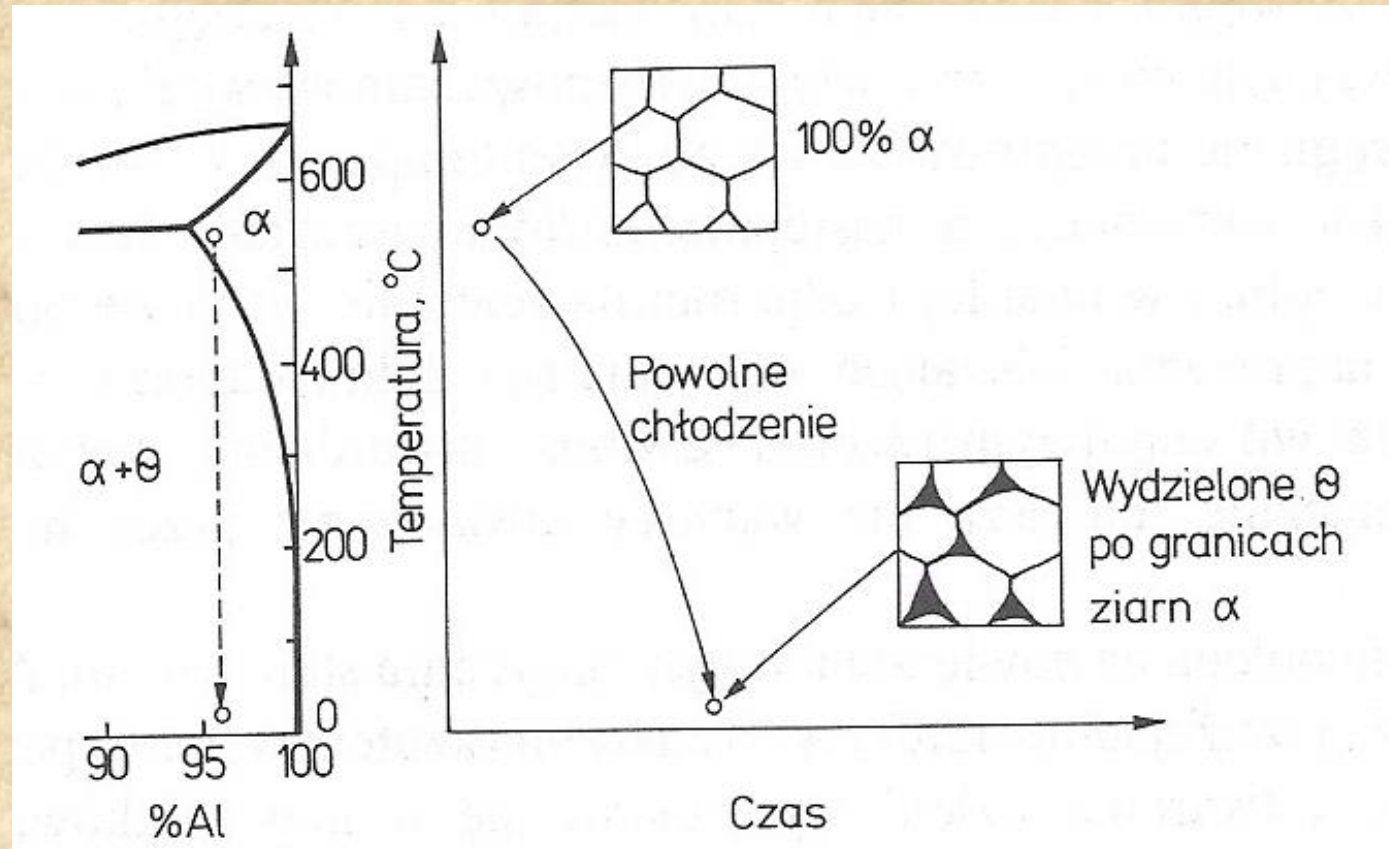
Liczne, drobne cząstki
wydzielen blokuja
poślizg w materiale.



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

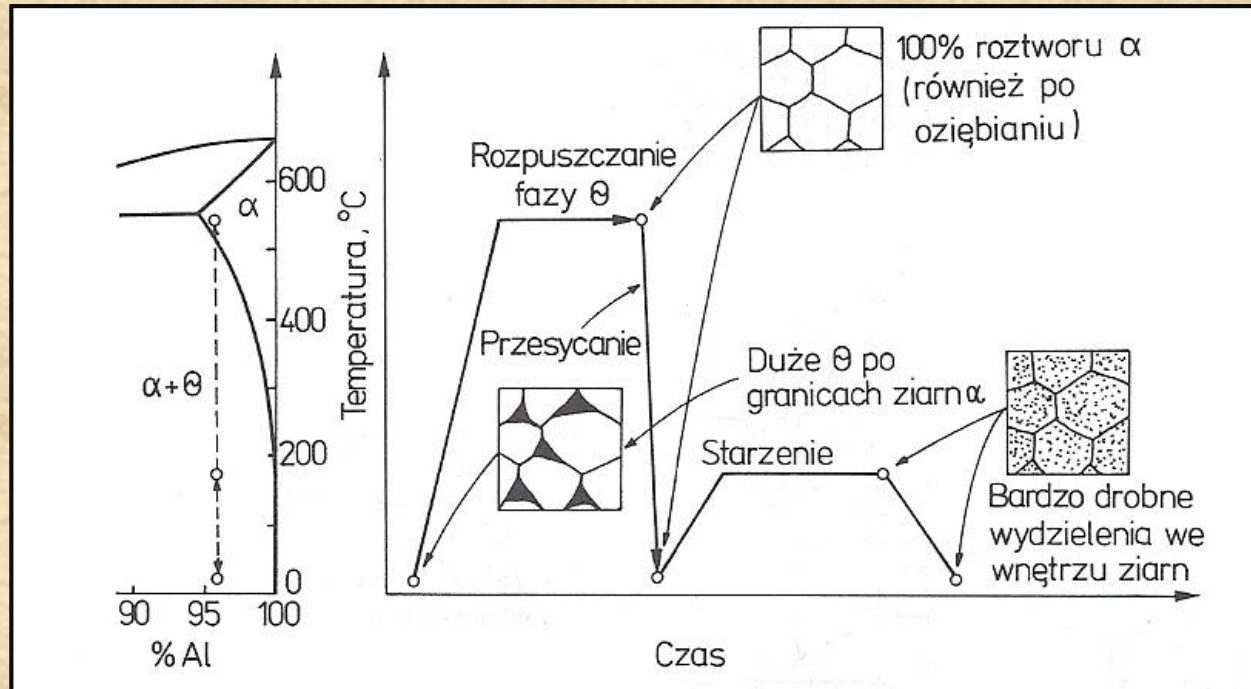


Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Powolne chłodzenie stopu AlCu_4 z zakresu jednofazowego do temperatury otoczenia powoduje tworzenie się dużych wydzieleni fazy θ (CuAl_2) na granicach fazy α

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

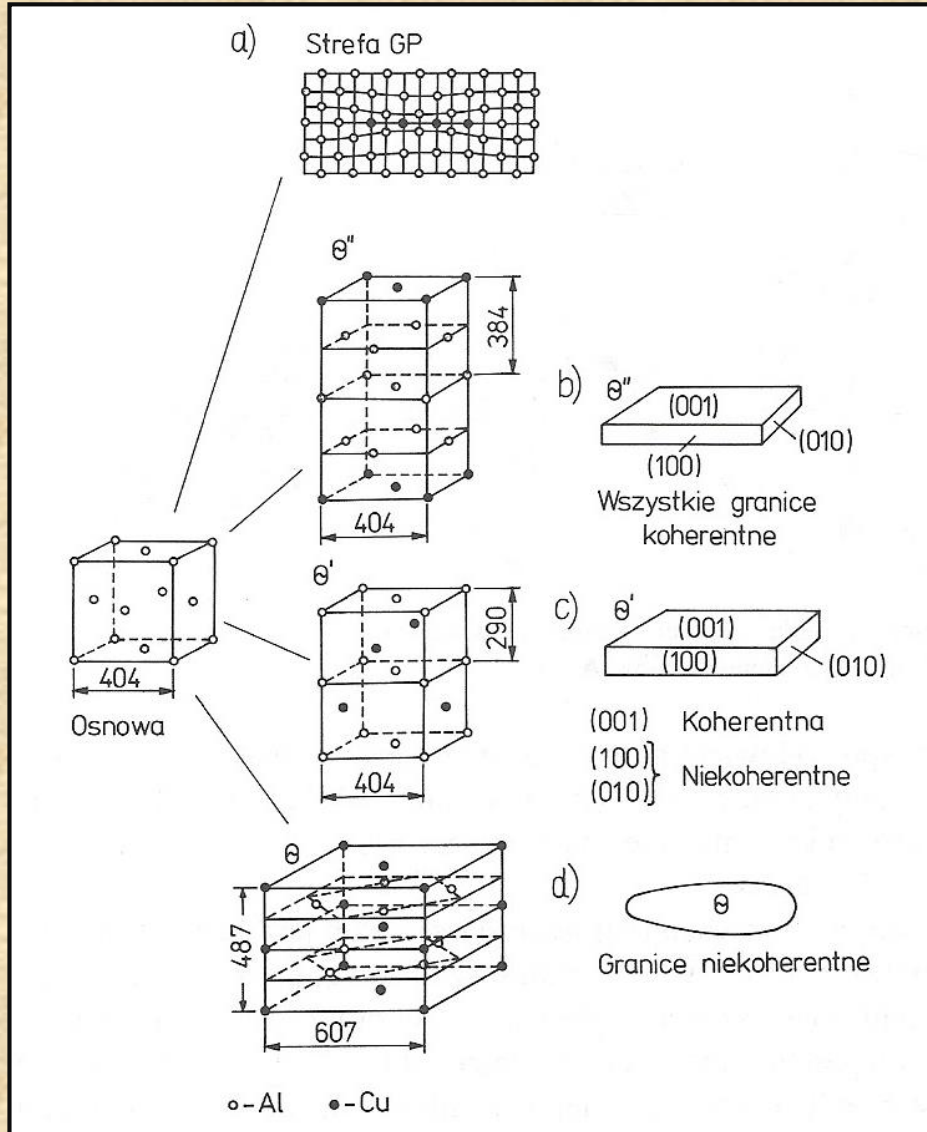


Schemat obróbki cieplnej prowadzącej do umocnienia wydzieleniowego stopu AlCu_4

- 1) **Rozpuszczanie** – stop nagrzewany jest do zakresu roztworu α i wytrzymywany w celu rozpuszczania cząstek θ
- 2) **Oziębienie (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 temperaturze podwyższonej (**starzenie przyspieszone/sztuczne**) w celu doprowadzenia do utworzenia wydzieleni w przesyconym roztworze.

Umocnienie wydzieleniowe

Tworzące się fazy metastabilne i faza stabilna podczas starzenia stopu AlCu_4

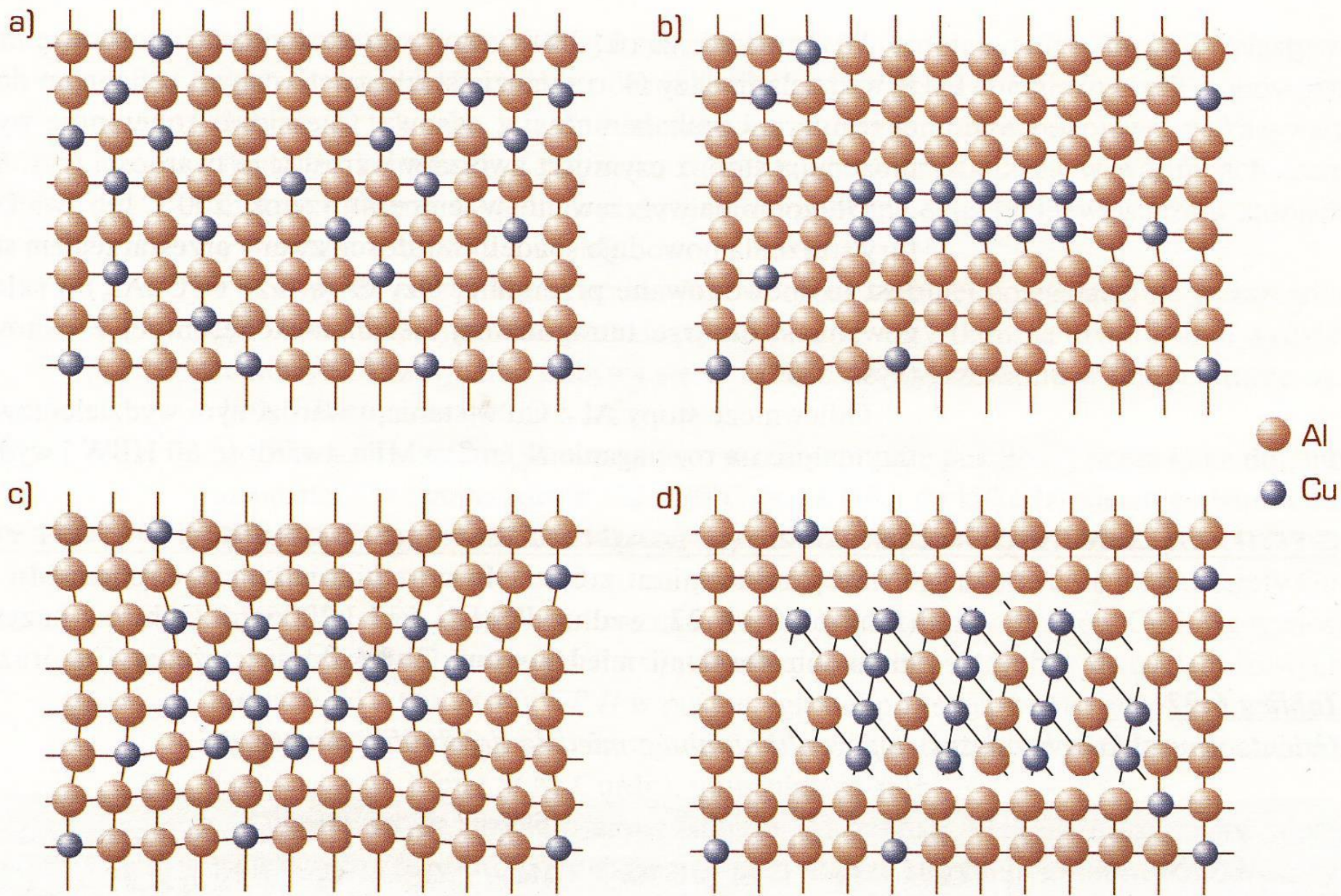


a) **Strefy Guinier-Prestona (GP)** zarodkują jednorodnie w przesyconej osnowie, mają kształt dysku i są w pełni koherentne z osnową; zachowaniu koherencji w obszarach krawędzi towarzyszą duże odkształcenia sprężyste;

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

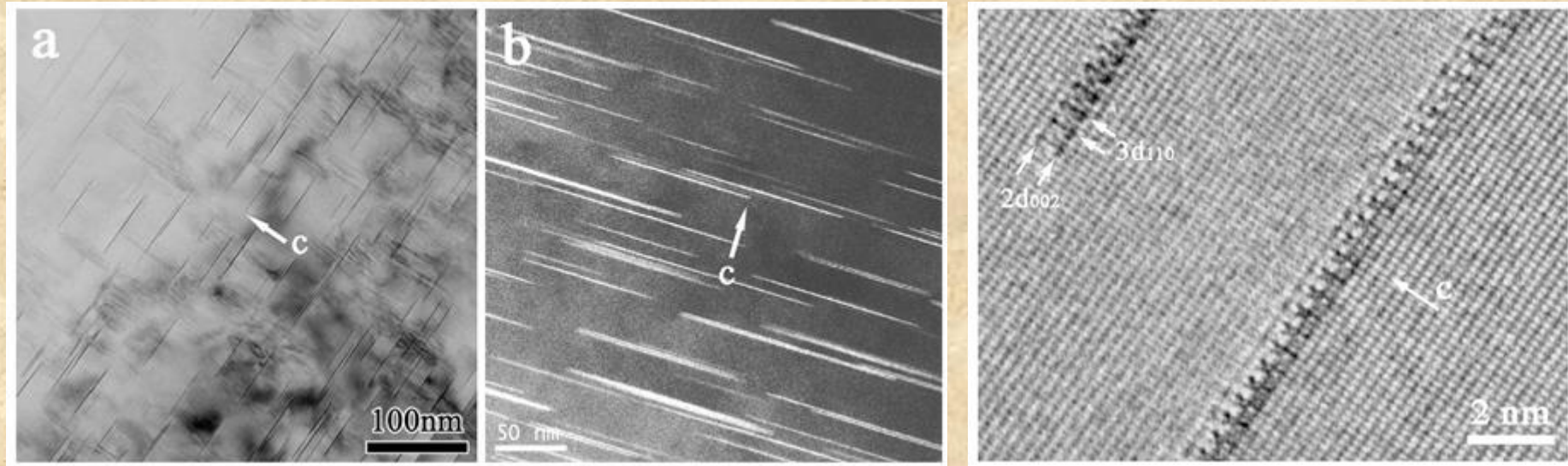
c) **Wydzielenia θ'** zarodkują na dyslokacjach, mają kształt płytek i płaskie powierzchnie są koherentne z osnową, krawędzie - nie;

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



Schemat kolejnych stadiów starzenia stopu AlCu_4 : a) roztwór stały α , b) strefa GP; c) faza przejściowa koherentna θ'' , d) faza równowagowa θ

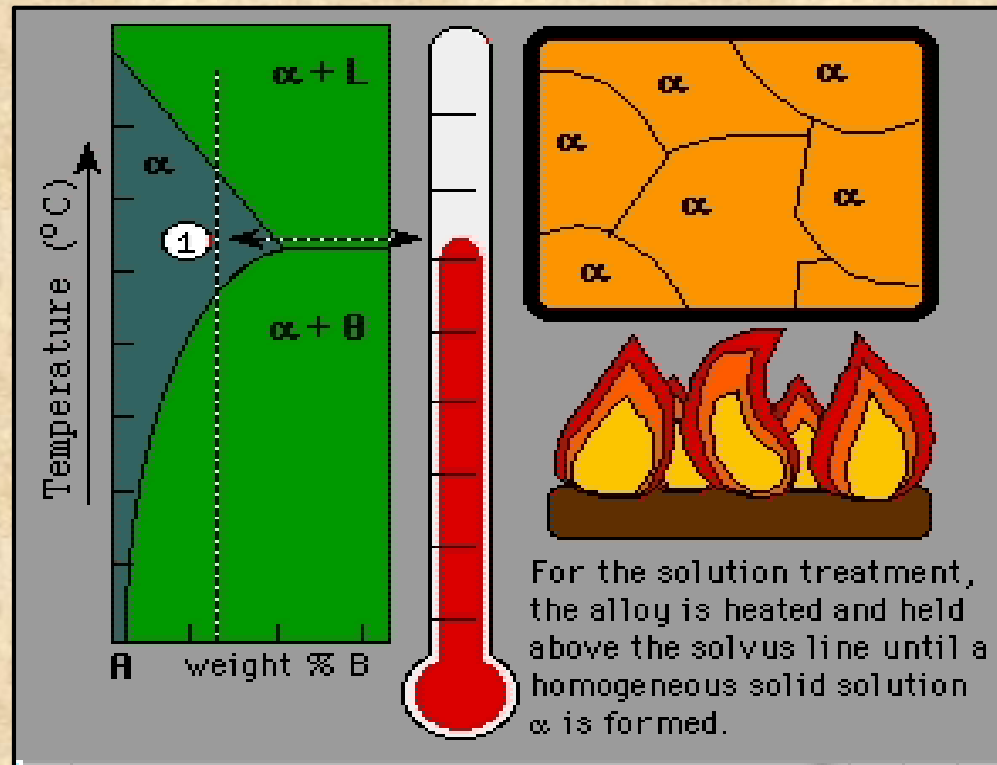
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Strefy Guinier-Prestona w stopie Mg-Gd-Zn

Step 1: Solution Treatment

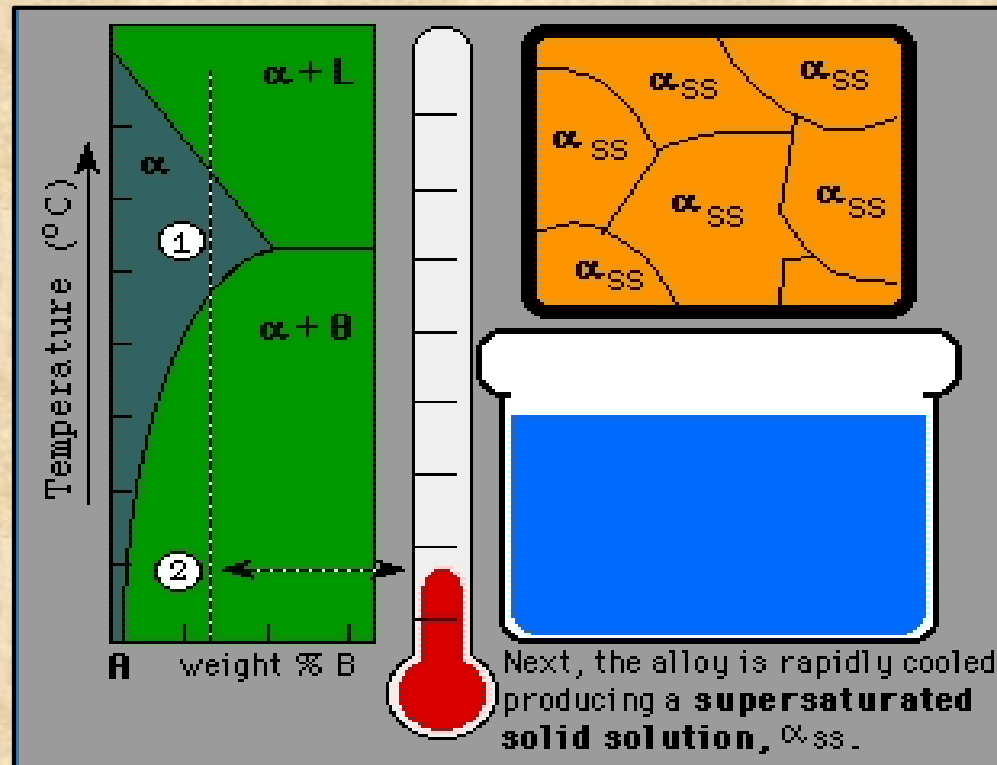
The alloy is heated just above the solvus temperature until a homogeneous alpha phase is produced. This step will dissolve any other phases present.



Step 2: Quench

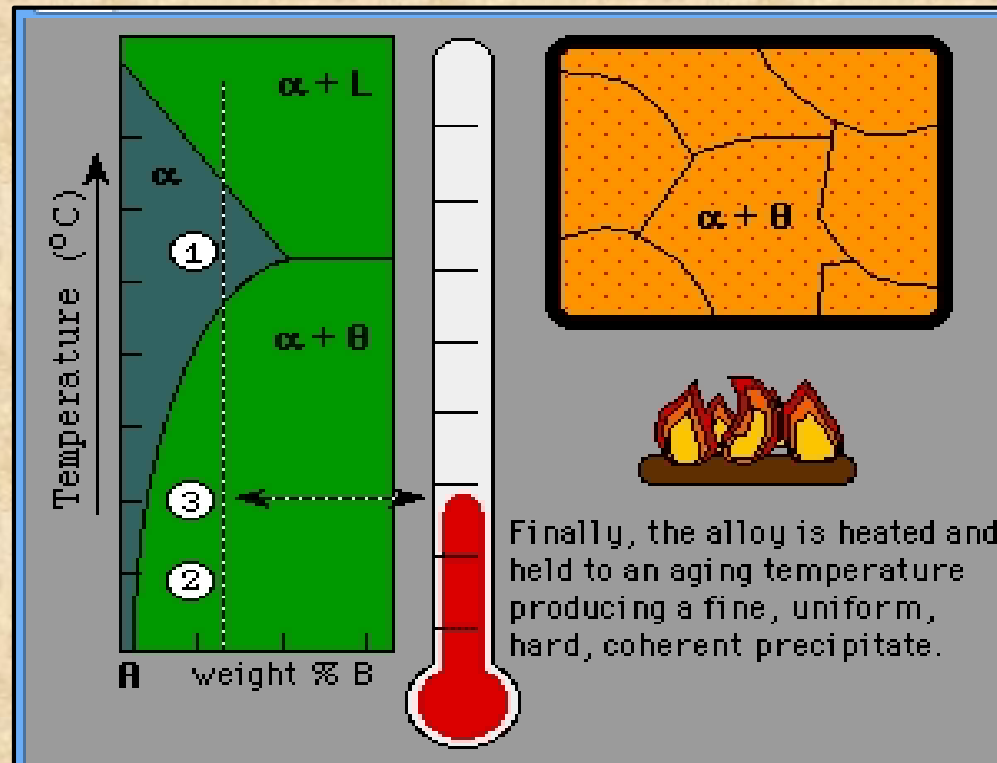
Now the alloy is rapidly cooled or quenched, not allowing the precipitate to form, and produces a supersaturated solid solution.

This is not an equilibrium structure!

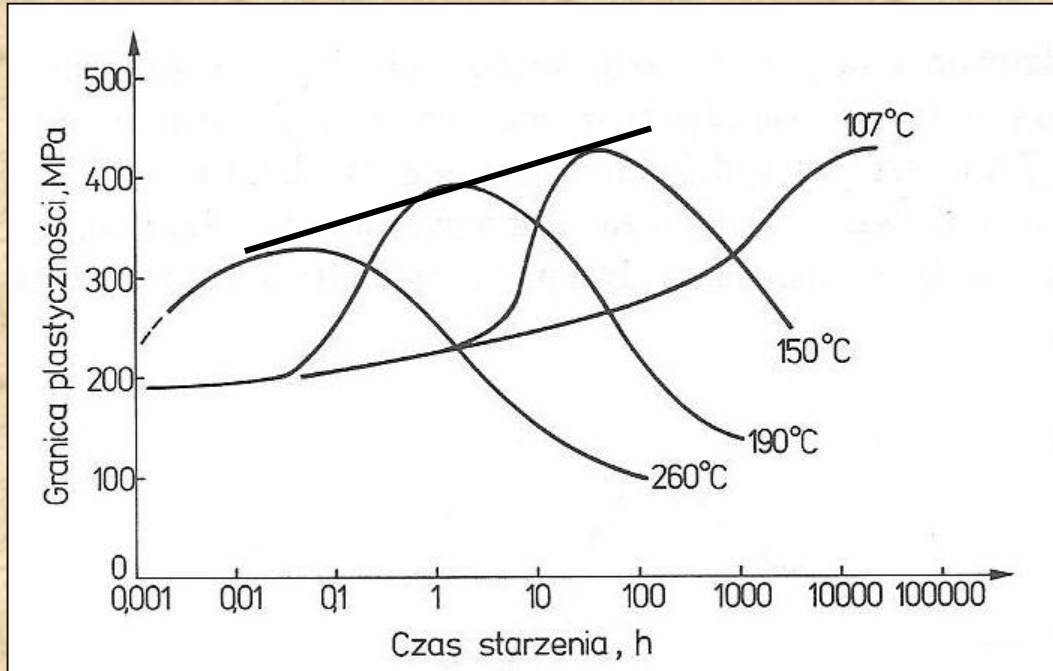


Step 3: Aging

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.



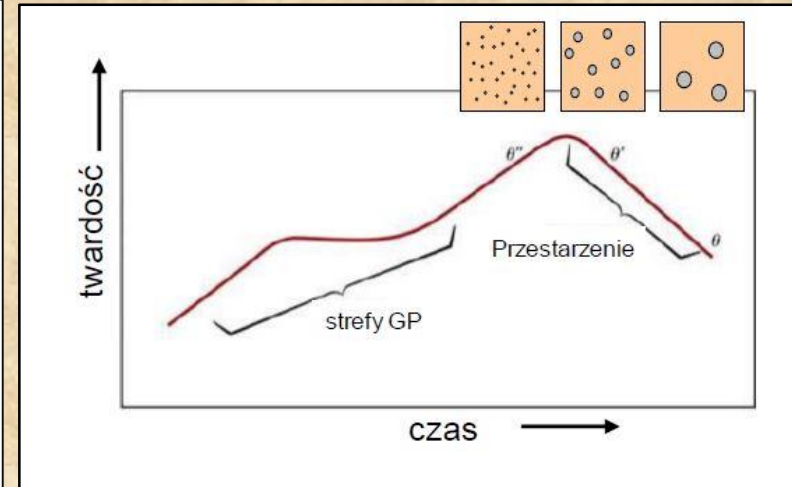
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



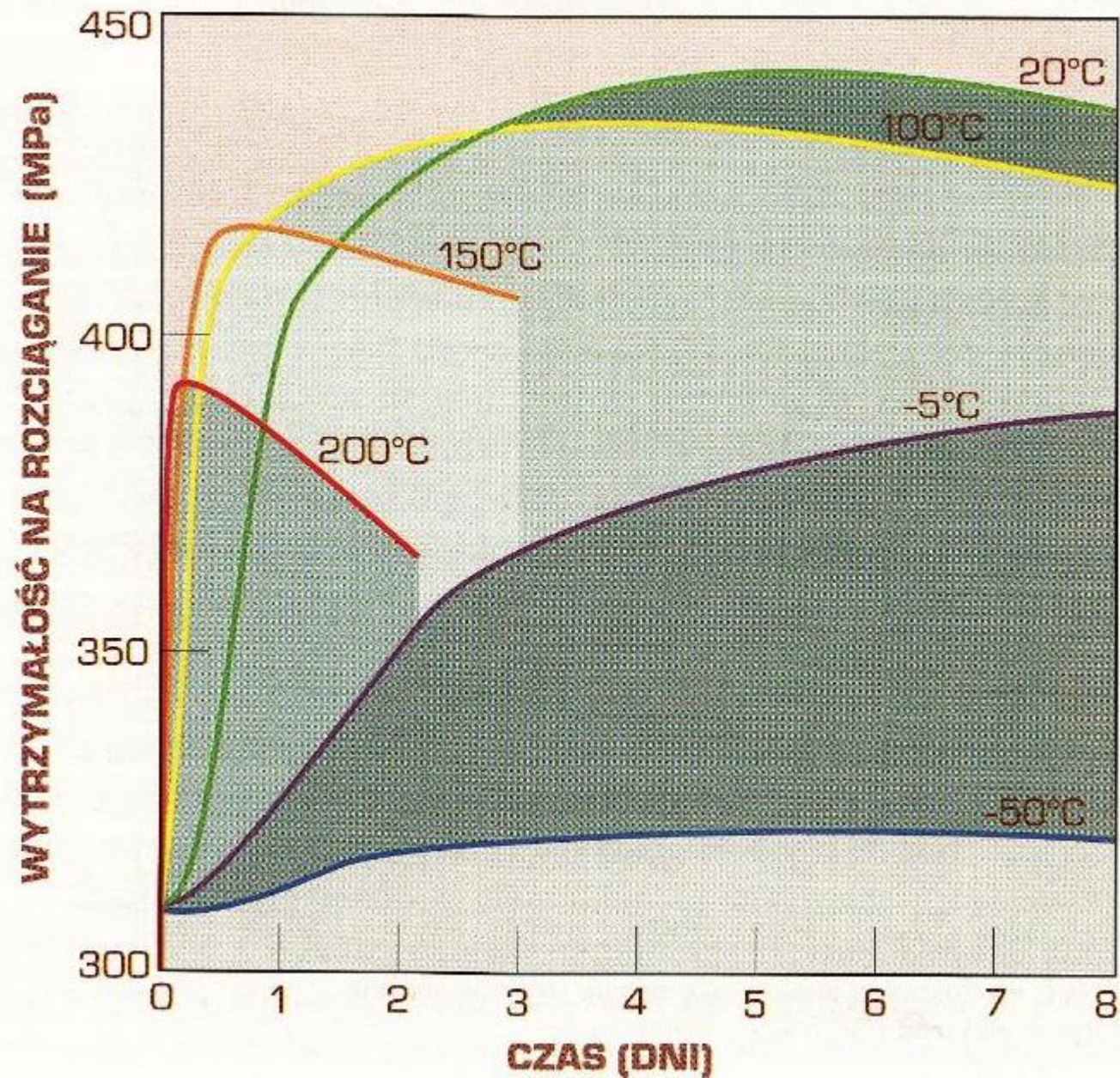
Granica plastyczności przesyconego stopu AlCu_4 w zależności od czasu starzenia w różnych temperaturach

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.



Twardość przesyconego, a następnie starzonego stopu AlCu_4 w zależności od czasu starzenia w temperaturze 150°C



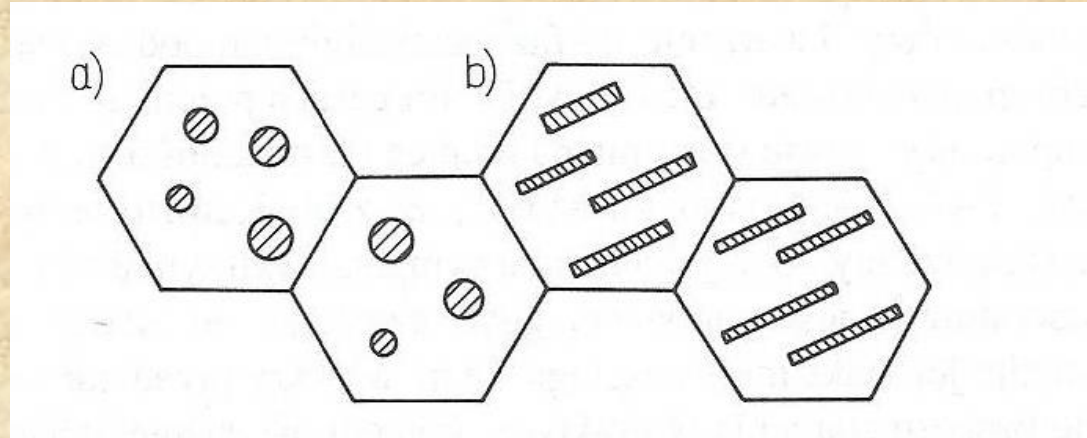
Wpływ temperatury i czasu starzenia na wytrzymałość na rozciąganie stopu AlCu₄

Umocnienie wydzieleniowe (wpływ orientacji)

Zasady dotyczące wydzielania się faz z przesyconych roztworów stałych:

1. Strefy GP i fazy koherentne zarodkują jednorodnie w osnowie.
2. Uprzywilejowanymi miejscami zarodkowania faz częściowo koherentnych 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).**

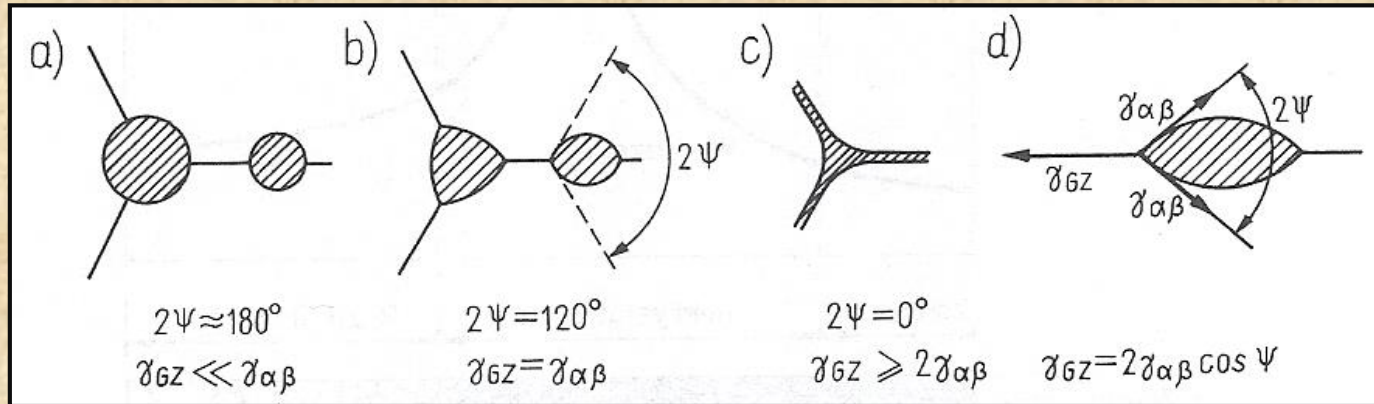
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Kształty cząstek innej fazy we wnętrzu ziaren osnowy są zależne od energii granic międzyfazowych:

1. Jeżeli energia granicy międzyfazowej nie zależy od orientacji granicy, to **cząstki wydzielenia są kuliste**.
2. Jeżeli niskoenergetyczna granica międzyfazowa istnieje tylko w jednej orientacji granicy międzyfazowej, to **cząstki wydzielenia mają kształt płytek**.

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Równowagowe kształty cząstek drugiej fazy na granicy ziaren i powierzchni granic ziaren zależne od wartości kąta 2ψ . Linie styku granic ziaren i powierzchnie granic ziaren są prostopadłe do ekranu. Kąt 2ψ jest jednoznacznie określony przez stosunek $\gamma_{GZ} / \gamma_{\alpha\beta}$, zatem jest taki sam dla cząstek wydzieleń na granicy ziaren i na styku trzech ziaren.

Kształt równowagowy wydzieleń 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.

Oddziaływanie dyslokacji z cząstkami

Umocnienie stopów cząstkami jest rezultatem oddziaływania cząstek z dyslokacjami. Oddziaływanie zależy od wymiarów cząstek, ich wytrzymałości i odległości między nimi. Wyróżnia się dwa mechanizmy oddziaływania dyslokacji z cząstkami:

- cząstki są przecinane przez dyslokacje,
- cząstki są opasywane i omijane przez dyslokacje.

Wydzielenia koherentne, zwłaszcza małe, są przecinane przez dyslokacje osnowy.

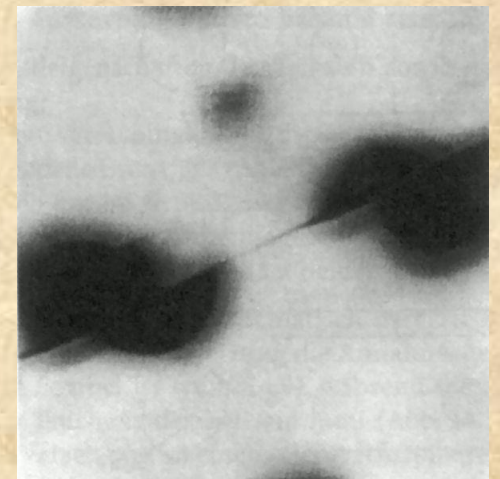
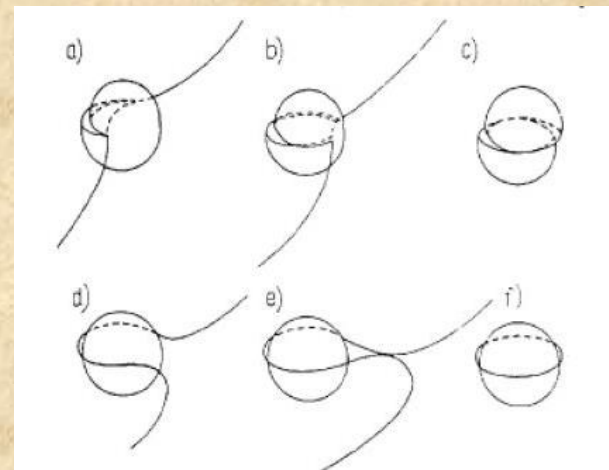
Jeżeli wydzielenia nie mogą być ścięte, gdyż są np. zbyt twarde, to dyslokacje opasują cząstki.

Po dojściu dyslokacji do cząstki zostaje ona w tym miejscu zatrzymana, ale między cząstkami może poruszać się nadal, w wyniku czego następuje wygięcie się dyslokacji, a następnie utworzenie pętli. Z chwilą powstania pętli dyslokacja uwalnia się i przemieszcza dalej, podczas gdy cząstka z utworzoną na niej pętlą dyslokacji stanowi bardziej efektywną przeszkodę dla ruchu następnych dyslokacji.

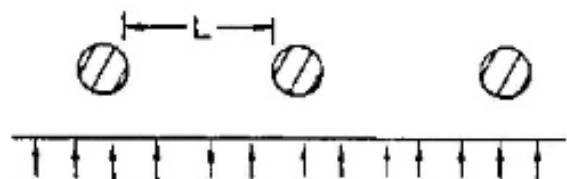
Oddziaływanie dyslokacji z cząstkami wydzieleń:

a-c) dyslokacja przecina cząstkę,

d-f) dyslokacja opasuje cząstkę (mechanizm Orowana)

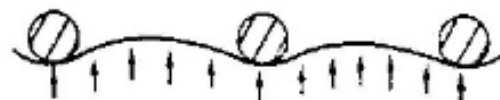


a) Zbliżanie się dyslokacji do przeszkody

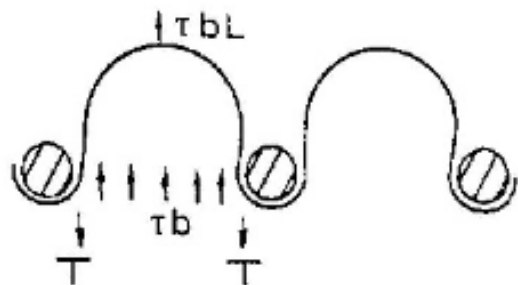


Sila τb na jednostkę długości dyslokacji

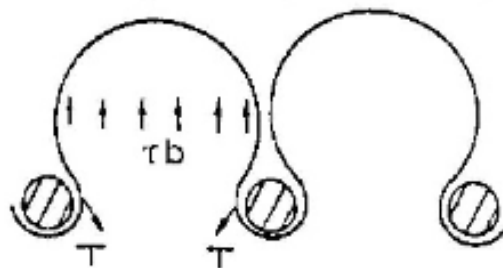
b) Oddziaływanie przeszkody na dyslokację - stadium początkowe



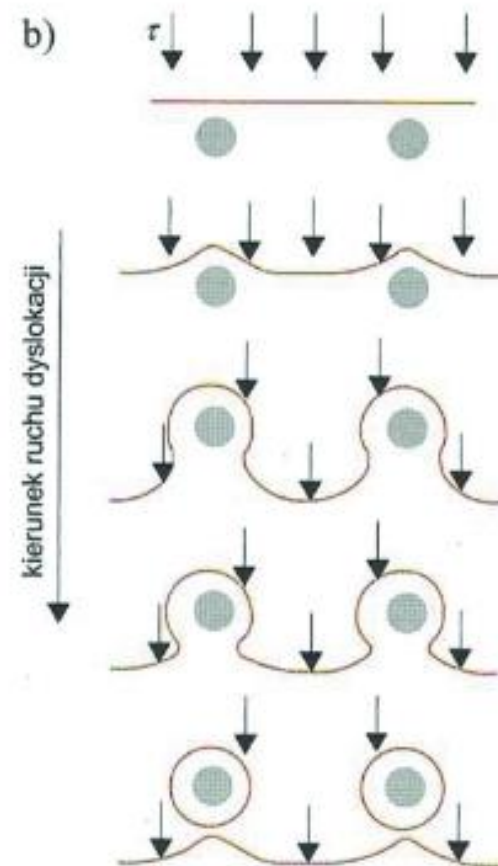
c) Oddziaływanie przeszkody na dyslokację - stadium krytyczne



d) Oddziaływanie przeszkody na dyslokację - stadium końcowe: tworzą się pętle dyslokacyjne wokół wydzieleń i dyslokacja kontynuuje swój ruch



b)



Wyginanie dyslokacji pomiędzy twardymi cząstkami innej fazy.

Napężenie styczne osiąga wartość krytyczną, gdy dyslokacja jest wygięta w łuk o promieniu równym połowie odległości między cząstkami.

$$\tau = C \frac{Gb}{r} f^{1/2}$$

τ – krytyczne naprężenie potrzebne do przepchnięcia dyslokacji między cząstkami

C – stała

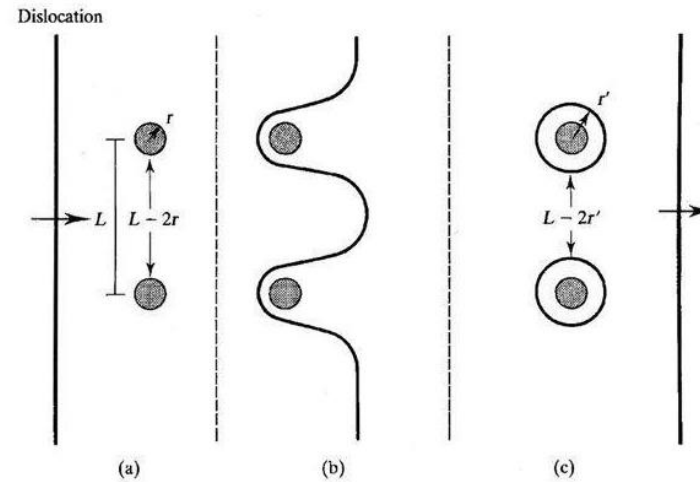
G – moduł sprężystości postaciowej

b – długość wektora Burgersa dyslokacji

r – promień cząstek

f – objętość względna cząstek

Oddziaływanie omijające – mechanizm Orowana



Ilustracja mechanizmu Orowana

Wzrost granicy plastyczności stopu zależy od ułamka objętościowego zajmowanego przez cząstki oraz od wielkości cząstek.

Im większy ułamek objętościowy cząstek oraz im cząstki są mniejsze, tym większe umocnienie.

Największe umocnienie powodują małe, wytrzymałe, gęsto rozmieszczone cząstki.

Cząstki duże, ale luźno rozmieszczone w strukturze nie wywołują znacznego umocnienia.

Dziękuję za uwagę