

Wykład 8



Henryk Adrian

Na podstawie:

M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Szybkość wzrostu

- ⌘ Liczba atomów przechodzących z fazy stałej do cieczy w ciągu sekundy

$$\frac{\nu}{6} n_A \exp\left(-\frac{\Delta G_m + \Delta G}{kT}\right)$$

- ⌘ Wypadkowa liczba atomów przechodzących z cieczy do kryształu w ciągu sekundy

$$n_w = \frac{\nu}{6} n_B \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{kT}\right) - \frac{\nu}{6} n_A \exp\left(-\frac{\Delta G_m + \Delta G}{kT}\right)$$

- ⌘ Zakładając: $n_A = n_B$

$$n_w = \frac{\nu}{6} n \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{kT}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right)\right)$$

Szybkość wzrostu

⌘ Przy małych wartościach x : $e^x \sim 1+x$

$$n_w = \frac{v}{6} n \frac{\Delta G}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{kT}\right)$$

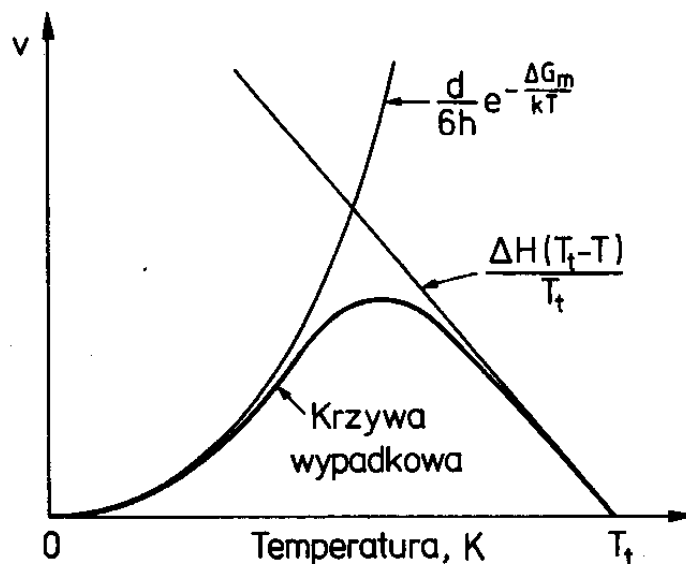
$$n_w = \frac{n}{6h} \frac{\Delta H \Delta T}{T_i} \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{kT}\right)$$

⌘ Szybkość migracji granicy, v :

$$v \approx d \frac{n_w}{n} = \frac{d}{6h} \frac{\Delta H \Delta T}{T_i} \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{kT}\right)$$

Migracja granicy międzyfazowej

⌘ szybkość wzrostu



Migracja granicy międzyfazowej podczas przemiany alotropowej

- ⌘ Szybkość wzrostu faz podczas przemian alotropowych w stanie stałym jest analogiczna jak przy krystalizacji, jeśli podczas przemiany nie zmienia się skład chemiczny
- ⌘ Podczas przemian fazowych, w których występuje zmian składu chemicznego, konieczny jest transport dyfuzyjny atomów na dalekie odległości. Równania opisujące szybkość wzrostu są bardziej złożone, ale wpływ przechłodzenia na szybkość wzrostu jest jakościowo podobny, jak na poprzednim rysunku

$$v = \frac{d}{6h} \frac{\Delta H \Delta T}{T_t} \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{kT}\right)$$

Zarodkowanie dyfuzyjne



- ⌘ W podwyższonych temperaturach zachodzi dyfuzyjne przemieszczanie atomów
- ⌘ W fazie termodynamicznie stabilnej fluktuacje rozmieszczenia atomów i fluktuacje stężenia w fazach wieloskładnikowych istnieją jedynie przejściowo
- ⌘ W fazach metastabilnych fluktuacje są potencjalnymi miejscami zarodkowania nowej stabilniejszej fazy
- ⌘ Podczas krystalizacji można ciecz znacznie przechłodzić, jeśli nie powstaną zarodki nowej fazy
- ⌘ Najczęściej przechłodzenie może być małe, bo ścianki naczynia i cząstki stałe zanieczyszczeń są katalizatorami zarodkowania

Zarodkowanie dyfuzyjne



⌘ Zarodkowanie

- ☑ Homogeniczne

- ☑ heterogeniczne

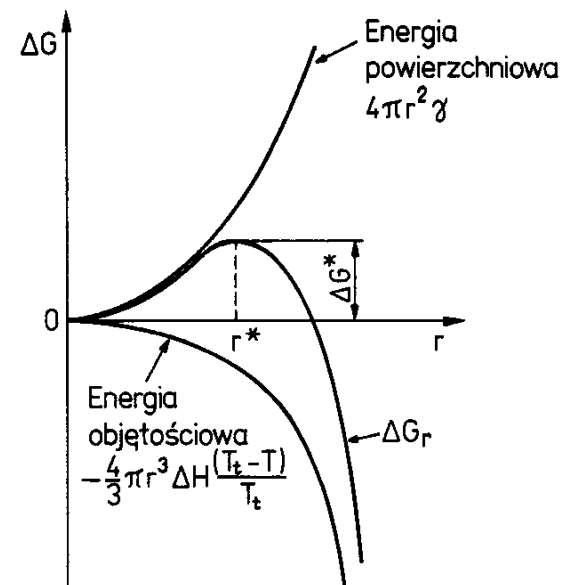
Zarodkowanie homogeniczne

⌘ Zmiana energii swobodnej

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$

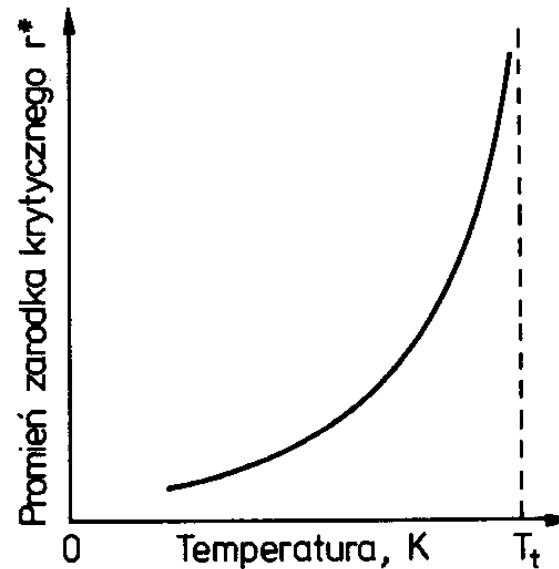
$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v} = \frac{2\gamma T_t}{\Delta H_v \Delta T}$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2}$$



Zarodkowanie homogeniczne

- ⌘ Promień krytyczny i praca zarodkowania
- ⌘ Zarodkowanie homogeniczne jest możliwe przy przechłodzeniach $\Delta T \sim 0.2T_t$

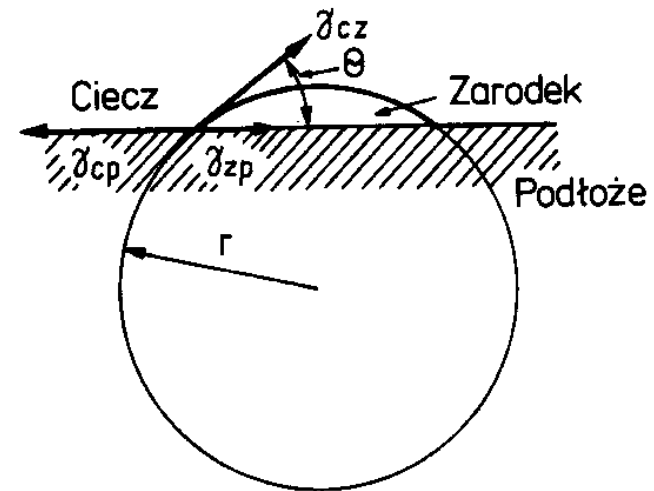


Zarodkowanie heterogeniczne

⌘ Zarodkowanie niejednorodne

$$\cos(\Theta) = \frac{\gamma_{cp} - \gamma_{zp}}{\gamma_{cz}}$$

⌘ Przy małym θ jest ułatwione zarodkowanie, jest on mały, gdy γ_{zp} jest małe



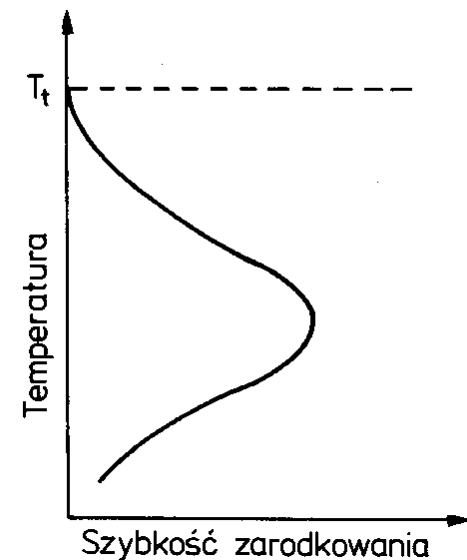
Kinetyka zarodkowania

⌘ Kinetyka zarodkowania

$$n_r = N \exp\left(-\frac{\Delta G_r}{kT}\right)$$

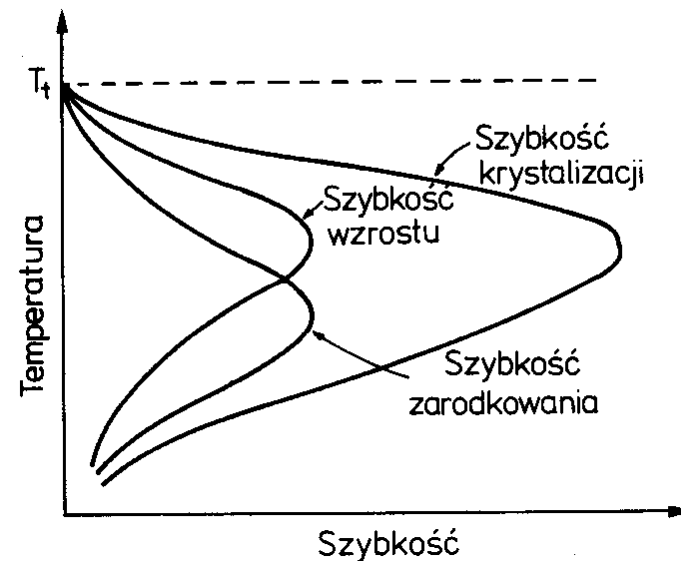
$$n^* = N \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right)$$

$$J^* = A \exp\left(-\frac{\Delta G^* + \Delta G_m}{kT}\right)$$



Kinetyka zarodkowania

- ⌘ Nieznacznie poniżej T_t szybkość zarodkowania jest mała a szybkość wzrostu dość duża. Powstaje struktura grubokrystaliczna
- ⌘ Przy dużym przechłodzeniu – struktura drobnokrystaliczna



Przemiany w stanie stałym



- ⌘ Kinetyka przemian fazowych jest przedstawiana za pomocą krzywych, przedstawiających ułamek objętości fazy w funkcji czasu dla danej temperatury
- ⌘ Na podstawie krzywych kinetycznych tworzy się wykres CTP, (czas temperatura, przemiana)
- ⌘ Poszczególne krzywe dotyczą: początku, 50% i końca przemiany
- ⌘ Kształt krzywych przypomina literę C, jak wynika to z wpływu temperatury na szybkość zarodkowania i wzrostu produktów przemian dyfuzyjnych

Wykresy CTP



⌘ Mamy dwa rodzaje wykresów

☒ CTP_i

☒ CTP_c

⌘ Dla celów praktycznych większe znaczenie mają wykresy CTP_c

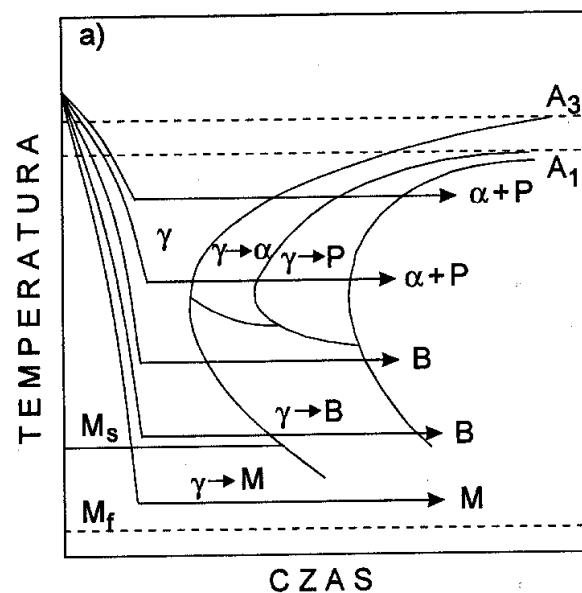
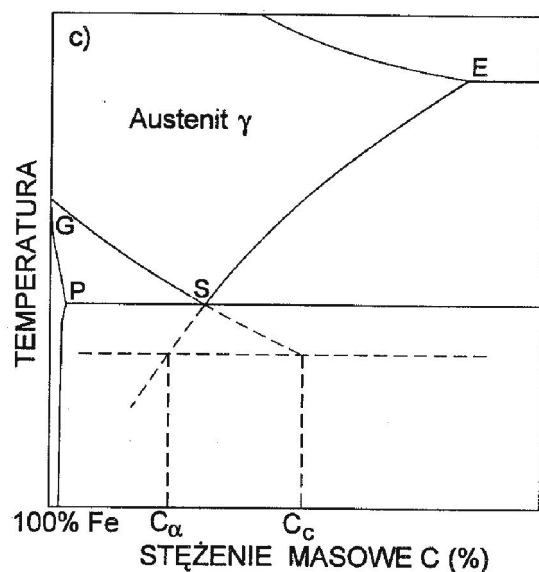
Wykres CTP



⌘ Rys. 7.19

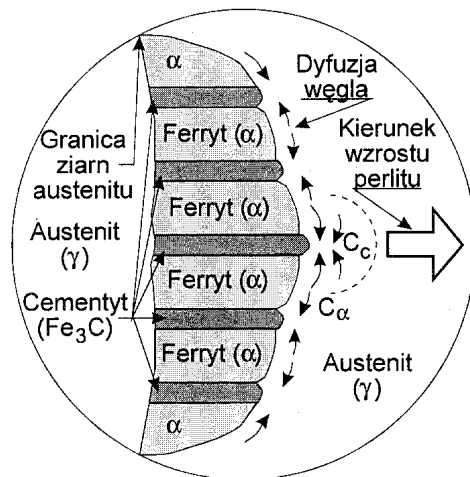
Przemiany przechłodzonego austenitu

⌘ Przemiana perlityczna



Przemiana perlityczna

- ⌘ Przemiana zachodzi przez kolejne zarodkowanie płytek cementytu i ferrytu i ich wzrost
- ⌘ Jest to proces związany z dyfuzją węgla
- ⌘ Odległość między płytkami zależy od przechłodzenia



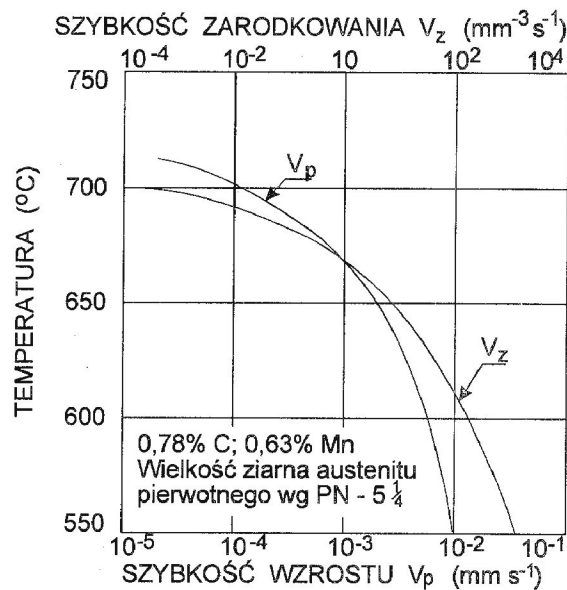
Przemiana perliyczna



- ⌘ Zachodzi w zakresie temperatur 727-550C
- ⌘ Od temperatury zależy grubość płytek ferrytu i cementytu
- ⌘ Przy niskich temperaturach tworzy się perlit drobnopłytkowy, zwany troostytem
- ⌘ W stalach podeutektoidalnych przemianę perlityczną poprzedza wydzielanie ferrytu
- ⌘ W stalach nadeutektoidalnych - cementytu

Przemiana perlityczna

- ⌘ Szybkość przemiany (v_z i v_w) rośnie wraz z obniżeniem temperatury



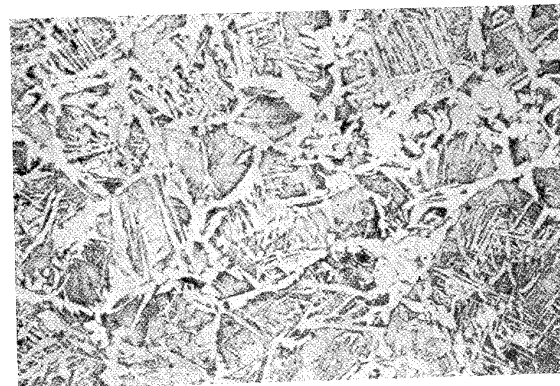
Przemiana perlityczna

- ⌘ Na szybkość przemiany wpływa wielkość ziarna austenitu oraz skład chemiczny
- ⌘ W zależności od temperatury uzyskuje się różną grubość płytek
- ⌘ Podział perlitu
 - ☒ perlit, $d=0.6 - 0.7 \mu\text{m}$ 180HB
 - ☒ perlit drobny $d=0.25\mu\text{m}$ 250HB
 - ☒ troostyt $d=0.1 \mu\text{m}$ 400HB

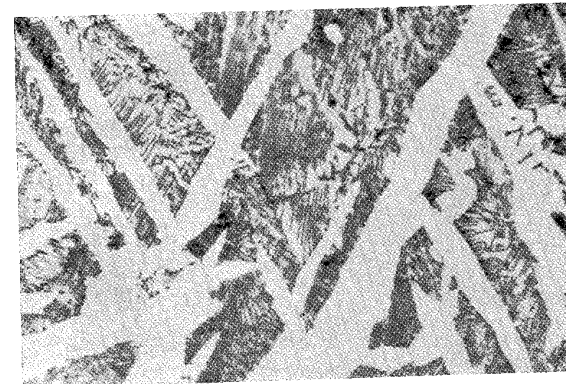
Przemiana perlityczna

⌘ przykłady mikrostruktur

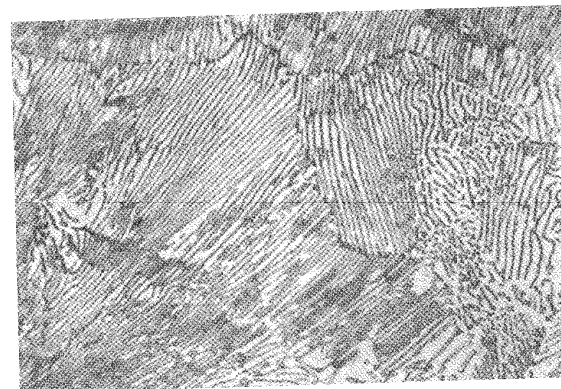
307



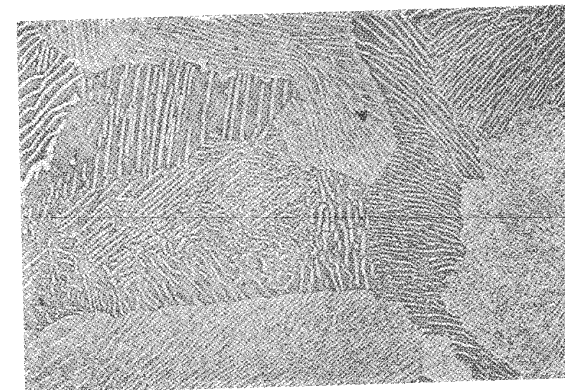
1 [2.3] 100 : 1



2 [2.3] 1 500 : 1



3 [1.1] 1 500 : 1



4 [2.3] 1 800 : 1

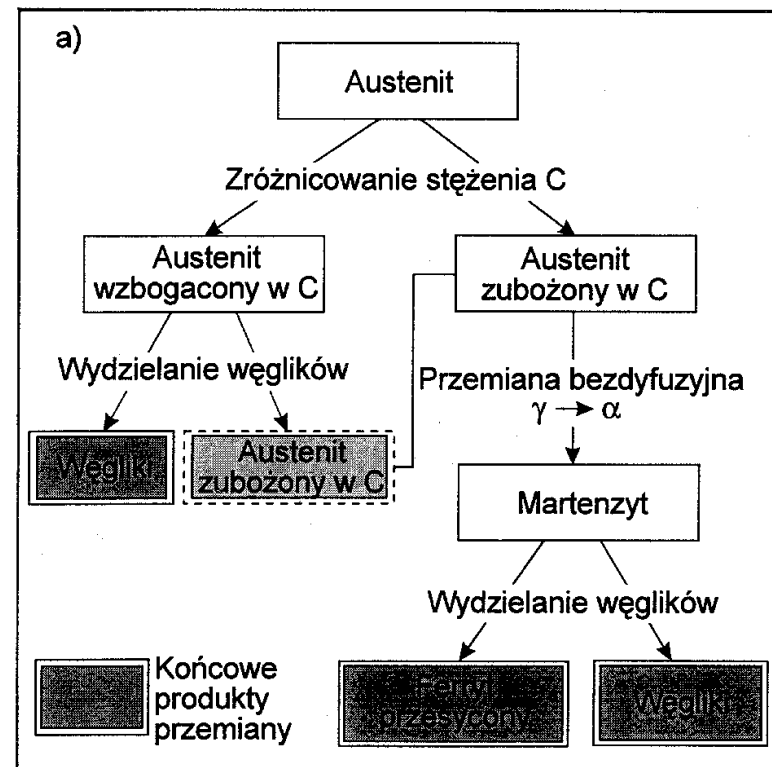
Przemiana perlityczna

⌘ Cechy przemiany perlitycznej

- ☒ zarodkowanie heterogeniczne
- ☒ wzrost płytek zachodzi w wyniku zmian dyfuzyjnych na froncie przemiany
- ☒ szybkość zarodkowania perlitu rośnie ze wzrostem przechłodzenia poniżej przemiany eutektoidalnej osiągając max. przy temperaturze 550°C, po czym maleje
- ☒ szybkość rozrostu zarodków jest stała przy danej temperaturze
- ☒ perlit składa się z naprzemianległych p tek ferrytu i cementytu
- ☒ brak zależności krystalograficznej pomiędzy austenitem i produktami rozpadu
- ☒ odległość między płytkami maleje ze wzrostem przechłodzenia

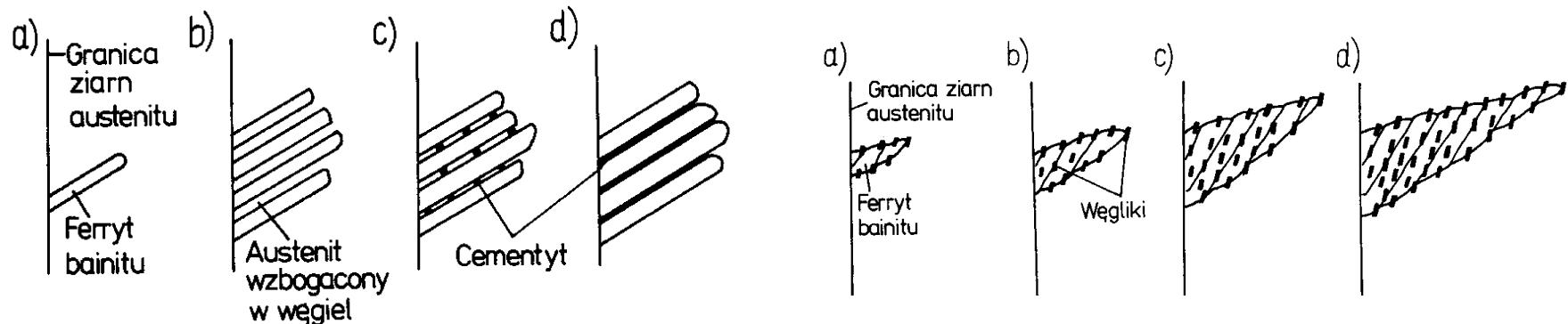
Przemiana bainityczna

- ⌘ Zachodzi przy chłodzeniu austenitu w zakresie 550 – Ms
- ⌘ Jest przemianą pośrednią, tzn że posiada cechy przemiany dyfuzyjnej i bezdyfuzyjnej



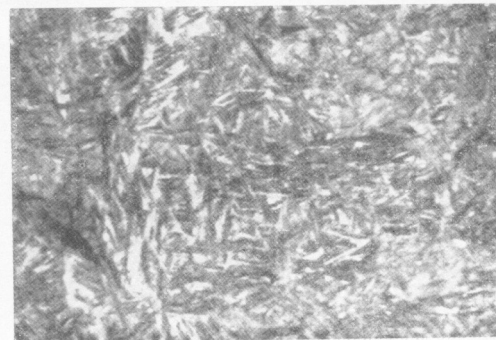
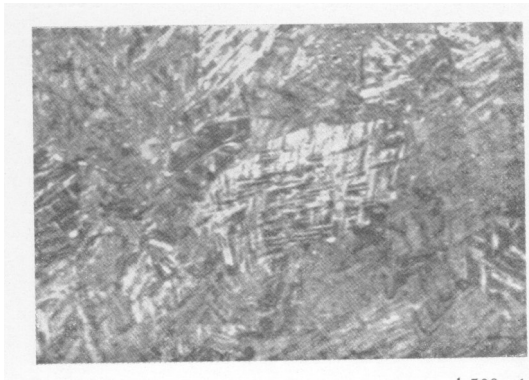
Przemiana bainityczna

- ⌘ produkty przemiany: bainit górny, bainit dolny
- ⌘ bainit jest mieszaniną przesyconego ferrytu i węglików
- ⌘ Bainit górny powstaje w zakresie 550-400C
 - ⌘ składa się z listew ferrytu o szerokości 0.5um między którymi znajdują się węgliki a niekiedy austenit
 - ⌘ Bainit dolny powstaje poniżej 400C
 - ⌘ wzrost cząstek węglików zachodzi tu we wnętrzu ferrytu
 - ⌘ przy obniżaniu T rośnie gęstość dyslokacji, przesylenie węglem i rozdrobnienie węglików



Przemiana bainityczna

- ⌘ bainit górny ma gorsze własności mechaniczne: niższą twardość i mniejszą odporność na pękanie
- ⌘ bainit dolny ma wyższą twardość i większą odporność na pękanie
- ⌘ przykłady mikrostruktur



Przemiana bainityczna

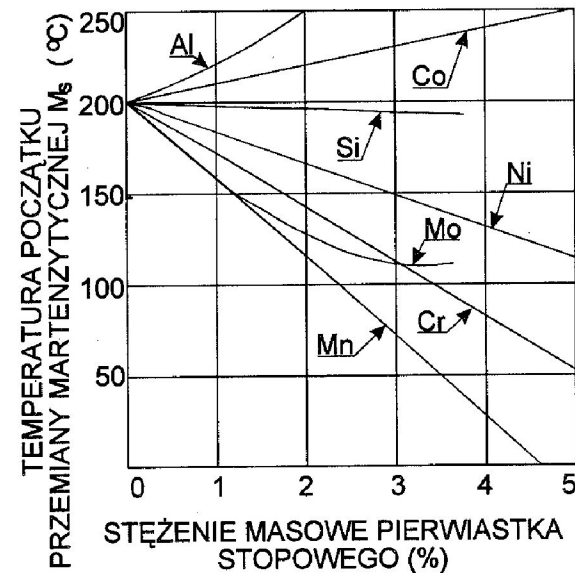
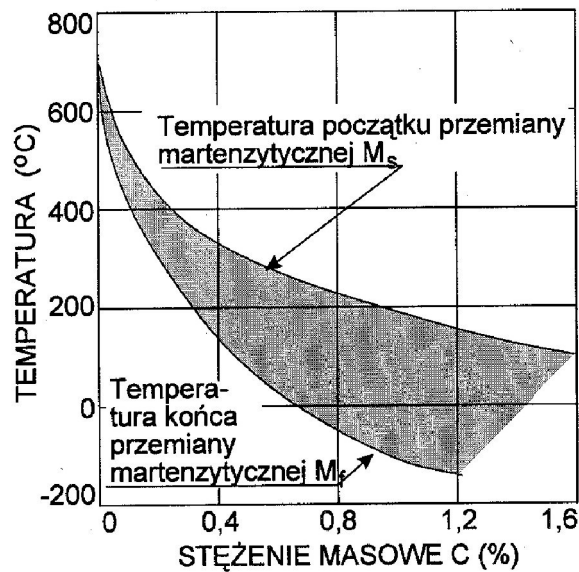
⌘ Cechy przemiany bainitycznej

- ⊞ przemianę poprzedza okres inkubacji, w którym zachodzą dyfuzyjne zmiany stężenia węgla w austenicie
- ⊞ zarodkowanie bainitu jest heterogeniczne i zaczyna się w obszarach zubożonych w węgiel w których zachodzi przemiana bezdyfuzyjna
- ⊞ rozrost bainitu jest kontrolowany dyfuzją – od niej zależy szybkość przemiany z obszarów bogatych w węgiel wydzielają się węgliki
- ⊞ mechanizm przemiany zależy od temperatury
- ⊞ bainit jest strukturą dwufazową złożoną z ferrytu przesyconego węglem i węglików
- ⊞ ferryt bainitu wykazuje zależność krystalograficzną zarówno z austenitem jak i cementytem bainitu

Przemiana martenzytyczna

⌘ Wpływ składu na M_s

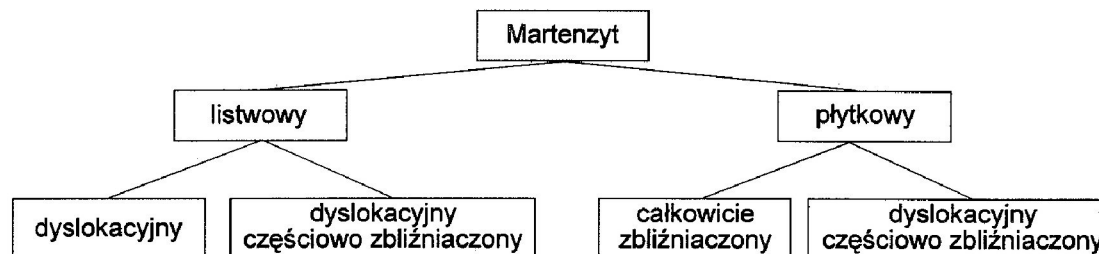
⌘ $M_s = 550 - 350C - 40Mn - 20Cr - 10Mo - 17Ni - 8W - 10Cu + 15Co + 30Al$



Przemiana martenzytyczna

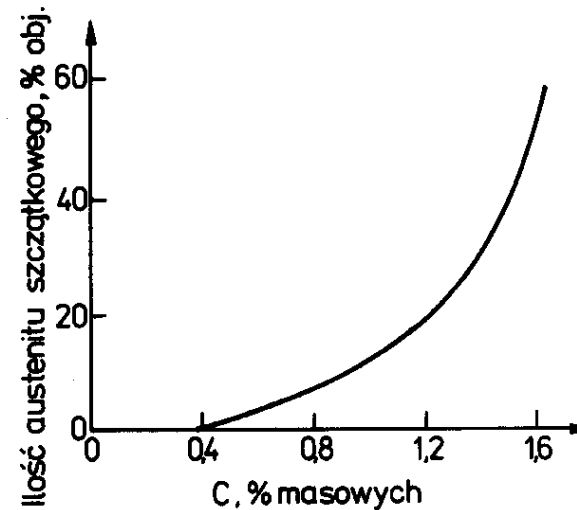
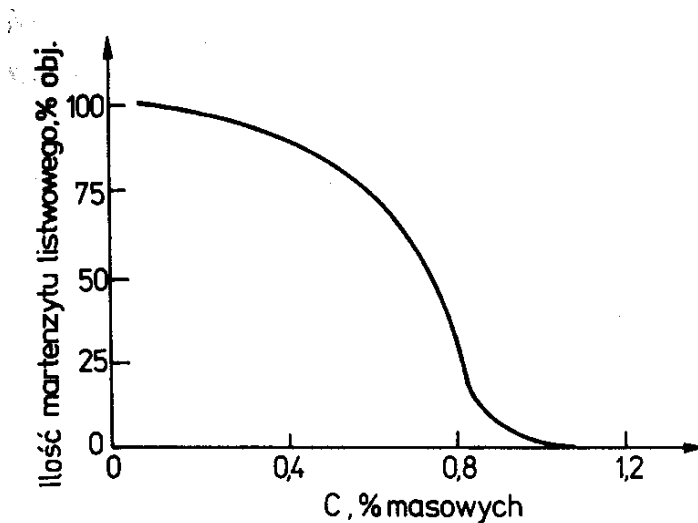
⌘ Rodzaje martenzytów

- ☑ martenzyt listwowy (przy mniejszej zaw. C)
- ☑ martenzyt płytkowy (przy większej zaw. C)



Przemiana martenzytyczna

- Wpływ C na rodzaj martenzytu i ilość austenitu szczątkowego



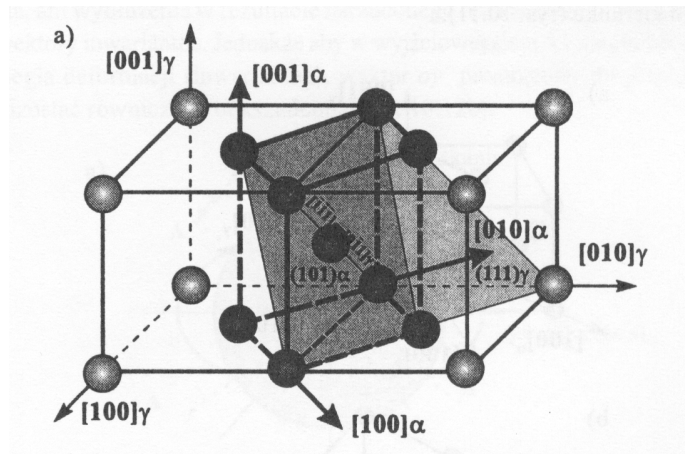
Przemiana martenzytyczna

⌘ Zależności krystalograficzne

⌘ Kurdiumowa-Sachsa:

⊠ $\{111\}_\gamma || \{110\}_\alpha$

⊠ $\langle 110 \rangle_\gamma || \langle 111 \rangle_\alpha$



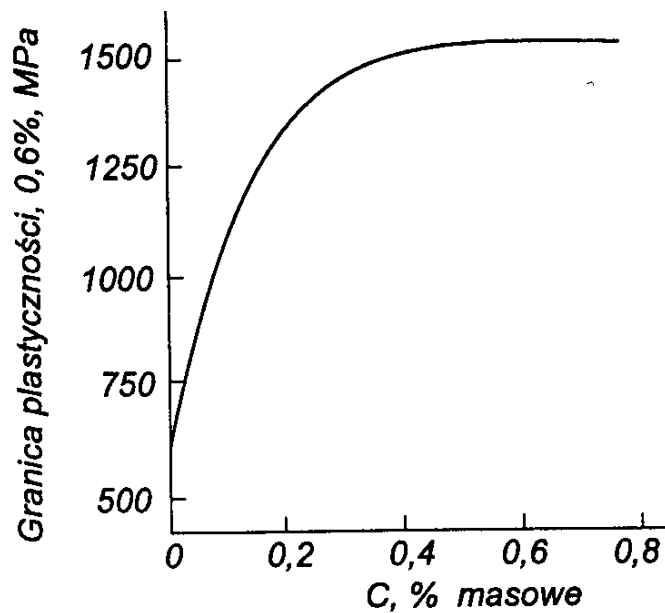
Przemiana martenzytyczna

⌘ źródła wytrzymałości martenzytu:

- ☒ duża gęstość dyslokacji i rozdrobnienie ziarna (grubość płytek jest mniejsza od 1 μm a listwy są jeszcze cieńsze)
- ☒ zawartość węgla - dominująca przy wyższych zawartościach C
- ☒ przykładowo udział mechanizmów umocnienia w R_m martenzytu stali zawierającej 0.4%C:
 - ☒ granice ziarn - 620MPa
 - ☒ dyslokacje - 270MPa
 - ☒ węgiel w roztworze: 1150MPa
 - ☒ inne - 200MPa

Przemiana martenzytyczna

⌘ Wpływ C na R_m martenzytu



Przemiana martenzytyczna

⌘ Cechy przemiany martenzytycznej

- ☒ zarodkowanie jest heterogeniczne, wzrost zarodków z reguły atermiczny
- ☒ przemiana polega na skoordynowanym przemieszczaniu atomów przy zachowaniu niezmiennego sąsiedztwa
- ☒ przemiana zachodzi przez wielokrotne ścinanie według mechanizmu poślizgu lub bliźniakowania
- ☒ w wyniku przemiany powstaje martenzyt listwowy lub płytkowy

Przemiana martenzytyczna

- ☒ przemiana zachodzi przy ciągłym obniżaniu temperatury pomiędzy M_s i M_f
- ☒ przemiana nie zachodzi do końca po jej zakończeniu pozostaje pewna ilość austenitu szczątkowego w wyniku rosnących naprężeń
- ☒ między płaszczyznami sieciowymi martenzytu istnieje ścisła zależność orientacji krystalograficznych
- ☒ Naprężenie rozciągające i odkształcenia plastyczne ułatwiają przemianę
- ☒ Izotermiczne wytrzymanie poniżej M_s stabilizuje austenit

Przemiana martenzytyczna

⌘ przykłady struktur martenzytu listwowego i płytkowego

