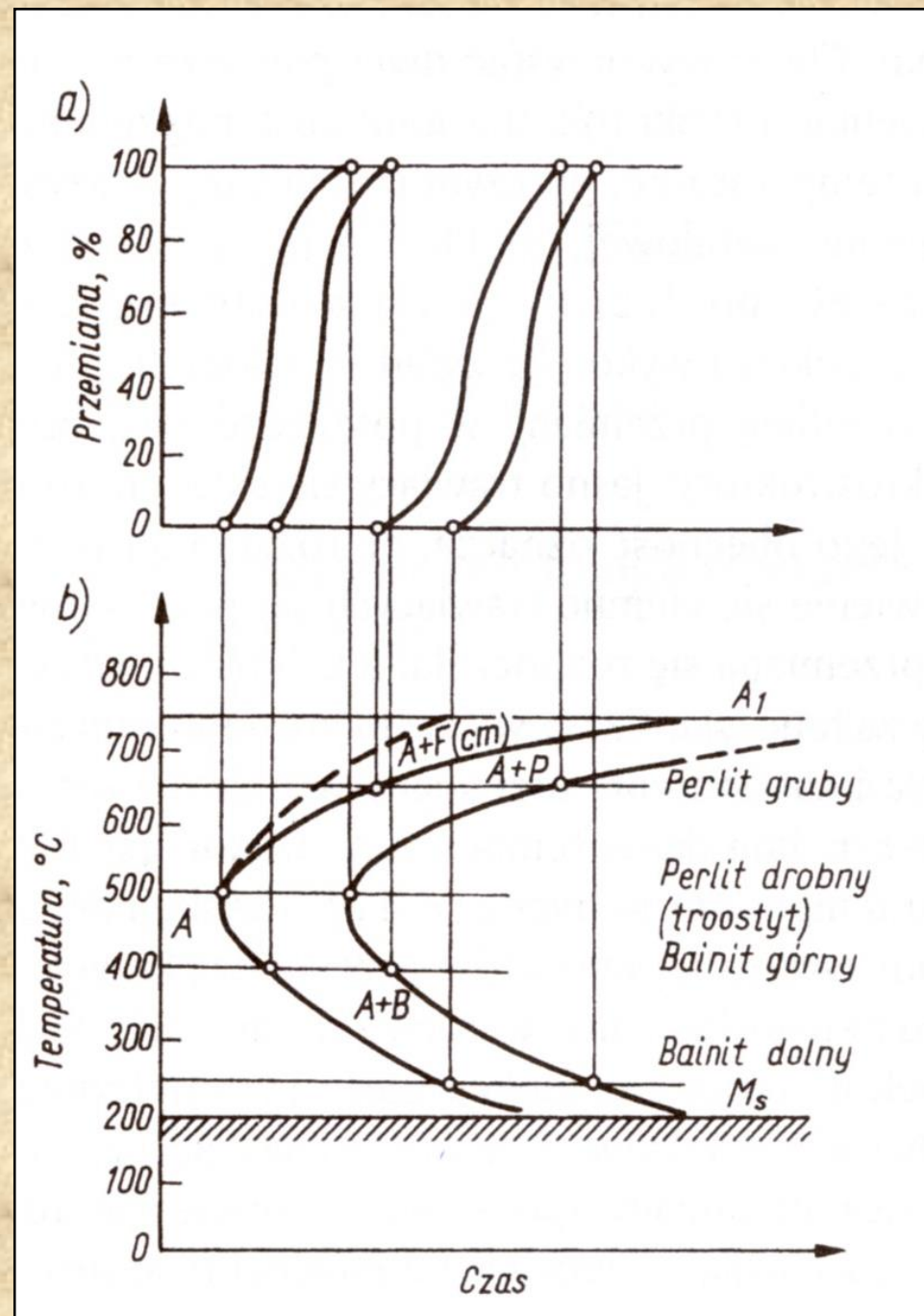


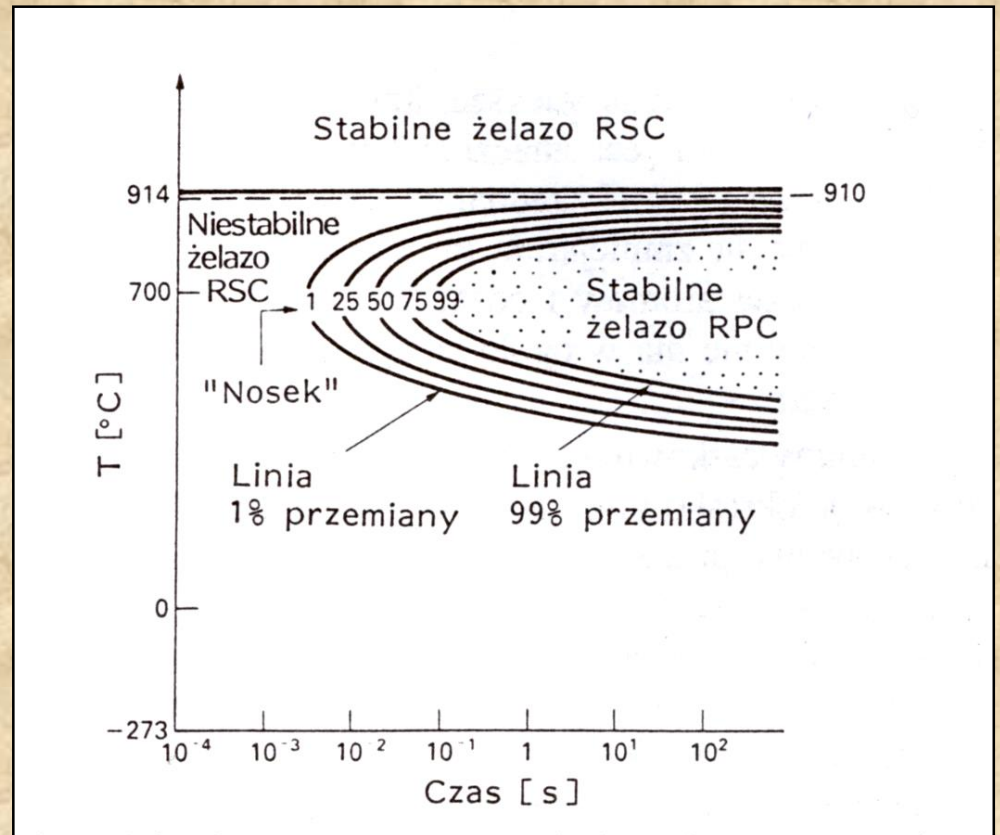
# Wykresy CTPi

- Kinetyka przemian fazowych - krzywe przedstawiające **ułamek** objętości tworzącej się fazy lub faz (struktur) w funkcji czasu.
- Na podstawie krzywych kinetycznych tworzy się wykresy CTP we współrzędnych:
  - temperatura na osi rzędnych
  - czas w skali logarytmicznej na osi odciętych.
- Nazwa CTP pochodzi od pierwszych liter wyrazów: **C**zas, **T**emperatura, **P**rzemiana.
- Wykres CTPi jest wykresem ilustrującym postęp przemiany w warunkach izotermicznych



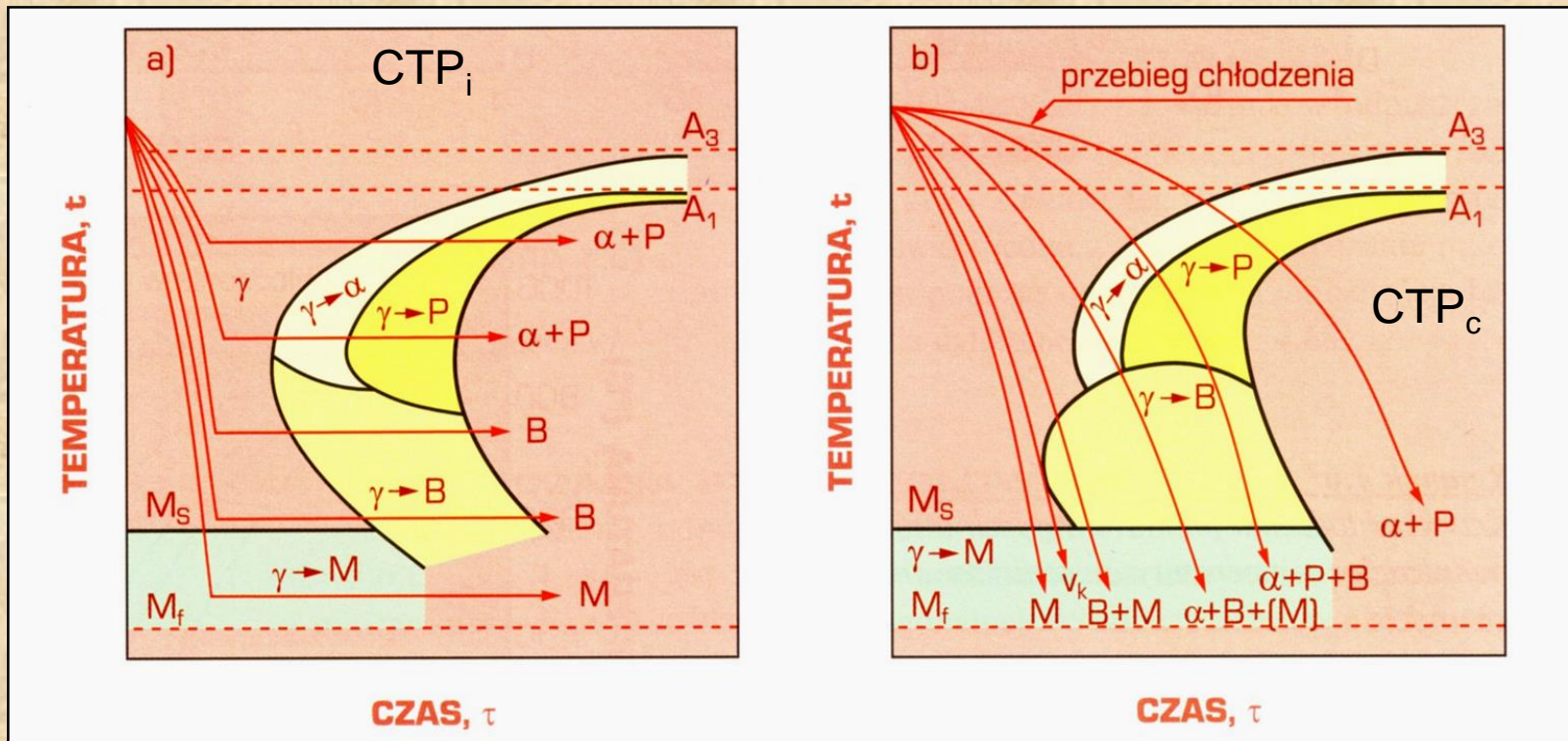
# Wykresy CTP

- Poszczególne krzywe na wykresie dotyczą zwykle:
  - ✓ początku przemiany,
  - ✓ 50% przemiany
  - ✓ końca przemiany.
- Krzywe na wykresach CTP mają kształt litery c, gdyż zarówno w pobliżu temperatury wysokich (tuż poniżej temp. równowagi) jak i w temperaturach niskich (gdzie ustają procesy dyfuzyjne), czas potrzebny do rozpoczęcia przemiany jest bardzo długi.

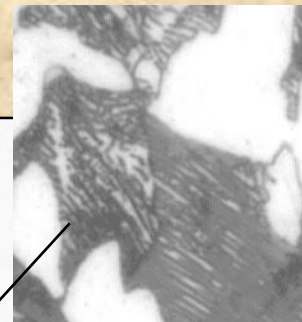




- CTP<sub>i</sub> – wykresy dla przemian izotermicznych (łatwiejsze do interpretacji)
- CTP<sub>c</sub> – wykresy dla przemian podczas chłodzenia ciągłego (stosowane dla przemysłowej obróbki cieplnej)



- Wykresy CPT<sub>i</sub> stosuje się dla stali ze względu na dużą różnorodność tworzących się mikrostruktur podczas przemiany przechłodzonego Fe<sub>γ</sub>



- Nomenklatura:

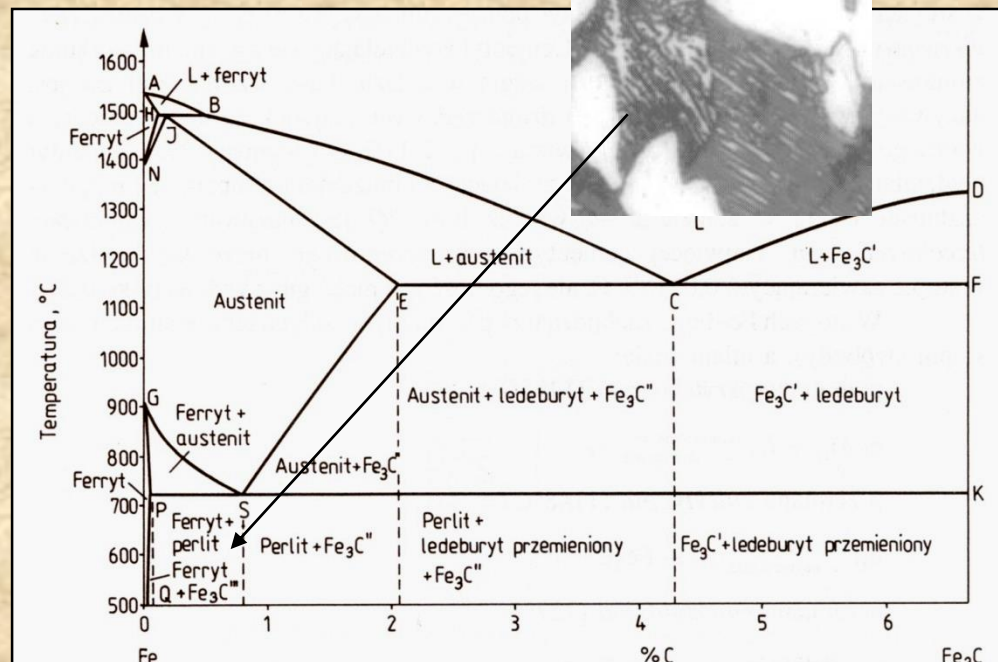
➤ linia PSK – A<sub>1</sub>

➤ linia GSK – A<sub>3</sub>

➤ linia NJ – A<sub>4</sub>

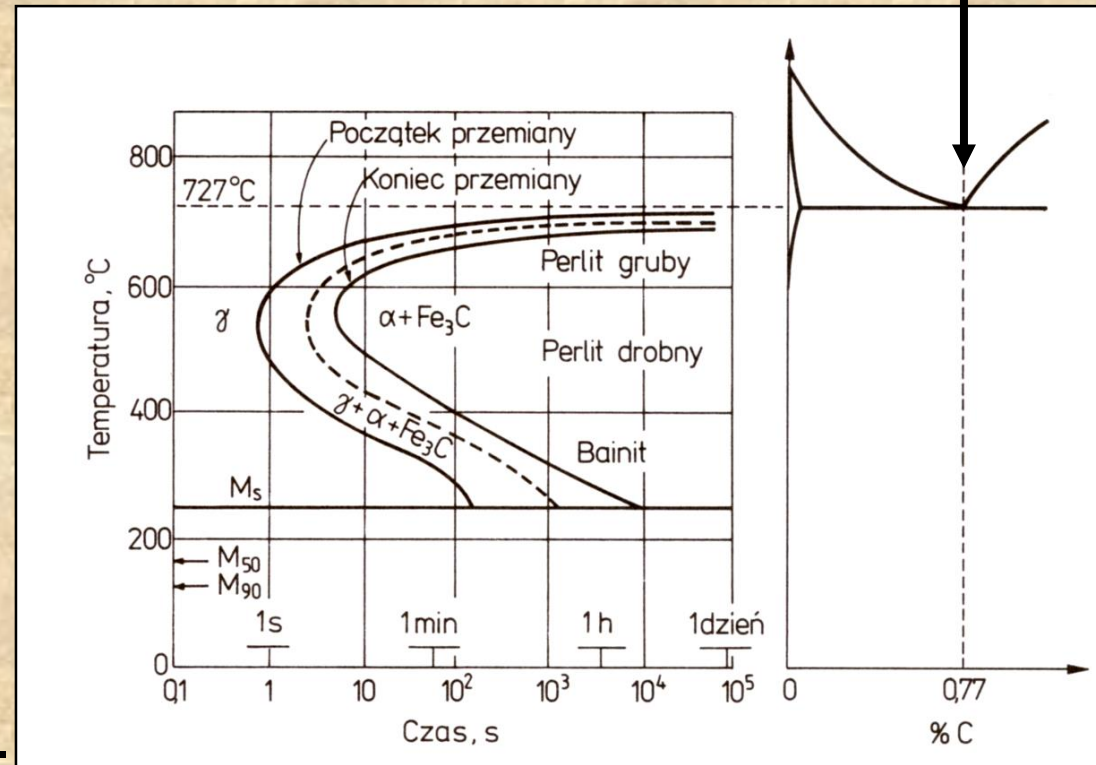
➤ linia SE – A<sub>C</sub>\*

➤ linia przemiany magnetyczne ferrytu – A<sub>2</sub> (770°C)



# CTP<sub>i</sub> dla stali o składzie eutektoidalnym

- Perlit nie jest jedyną strukturą powstającą w wyniku przemiany austenitu.
- W zależności od temp. przemiany - **rożne typy perlitu**
- **Perlit grubopłytkowy** – przemiana nieznacznie poniżej temp. przemiany eutektoidalnej
- **Perlit drobny** – wraz z obniżaniem temperatury – perlit drobniejszy
- **Troostyt** – w temp. 550°C tj. temp. najmniejszej trwałości Fe<sub>γ</sub>, perlit jest tak drobny, że przy powiększeniu 1500x wygląda jak jednorodny składnik

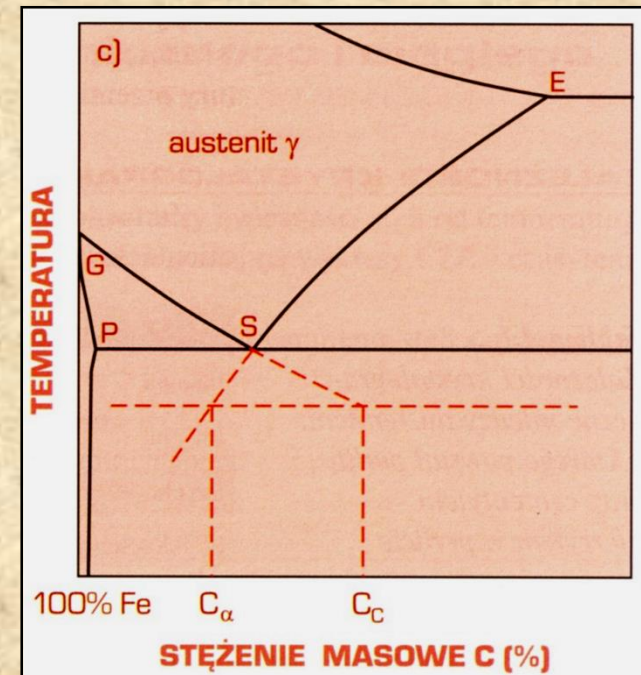
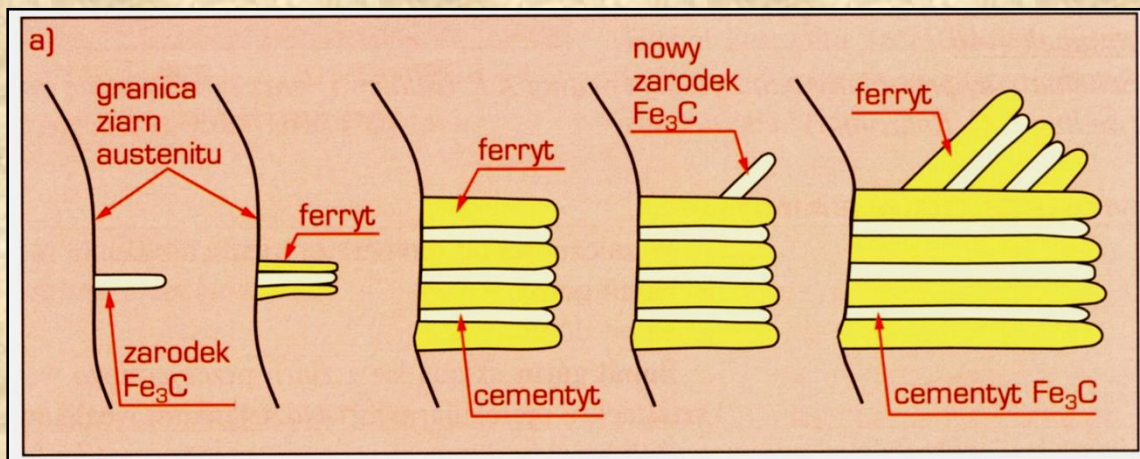
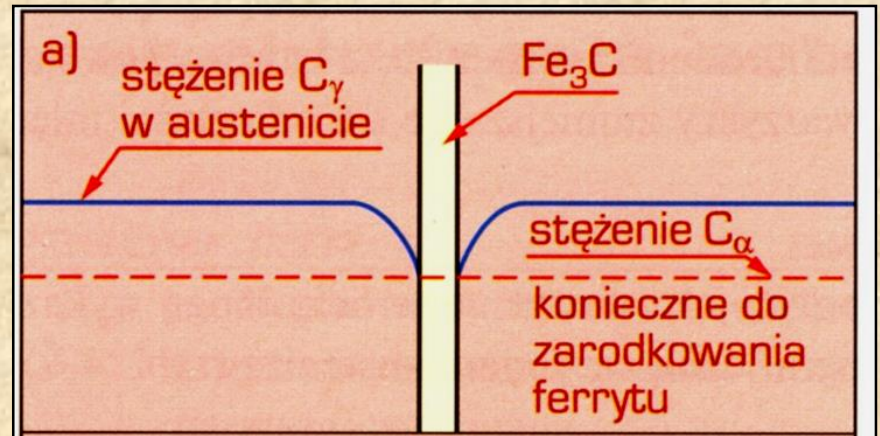




# Mechanizm przemiany perlitycznej

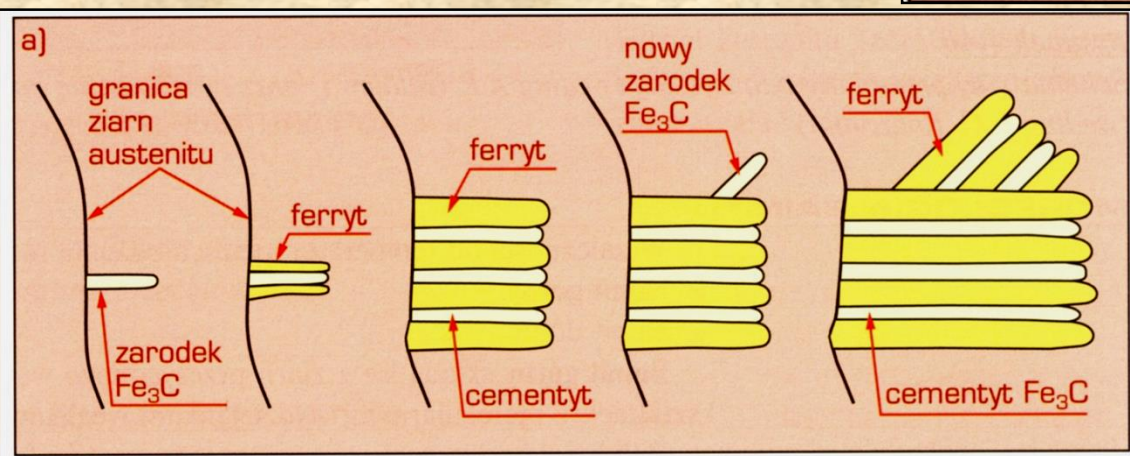
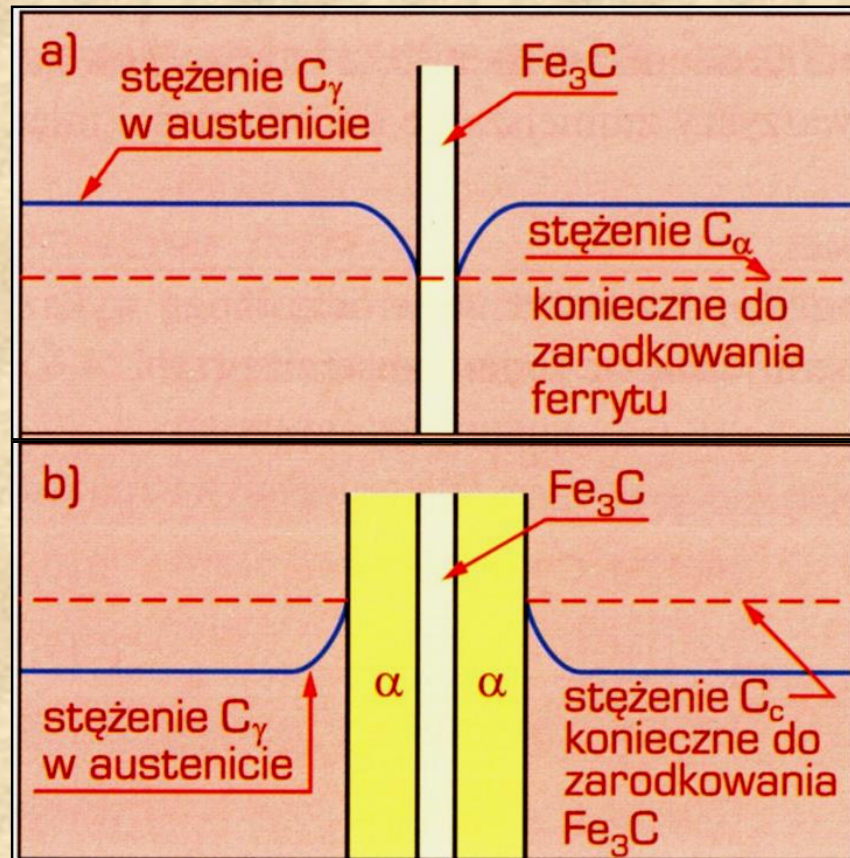
- Przemiana perlityczna zachodzi po ochłodzeniu austenitu nieznacznie poniżej temp.  $A_1$  (linia PSK). W jej wyniku z  $Fe_\gamma$  powstaje mieszanina eutektoidalna złożona z płytek ferrytu i cementytu – **perlit**. Siłą pędną przemiany perlitycznej jest różnica energii swobodnej austenitu i mieszaniny ferrytu i cementytu.
- Przemiana perlityczna jest przemianą dyfuzyjną związaną z przegrupowaniem atomów węgla i zachodzącą przez zarodkowanie i wzrost zarodków.
- Zarodkowanie perlitu zachodzi **heterogenicznie**, czyli w sposób uprzywilejowany na cząstkach cementytu, płytkach ferrytu, a w jednorodnym austenicie – na granicach  $Fe_\gamma$ .

Wzrost płytki  $\text{Fe}_3\text{C}$  bogatej w węgiel powoduje znaczne zmniejszenie stężenia C w austenicie do stężenia  $C_\alpha$





To zmniejszenie stężenia C w austenicie do stężenia  $C_\alpha$  umożliwia powstanie płytki ferrytu  $Fe_\alpha$



W wyniku ograniczonej rozpuszczalności C w ferrycie  $Fe_\alpha$ , jego nadmiar wzbogaca austenit w pobliżu utworzonej płytki ferrytu umożliwiając tworzenie kolejnych płytek cementytu  $Fe_3C$

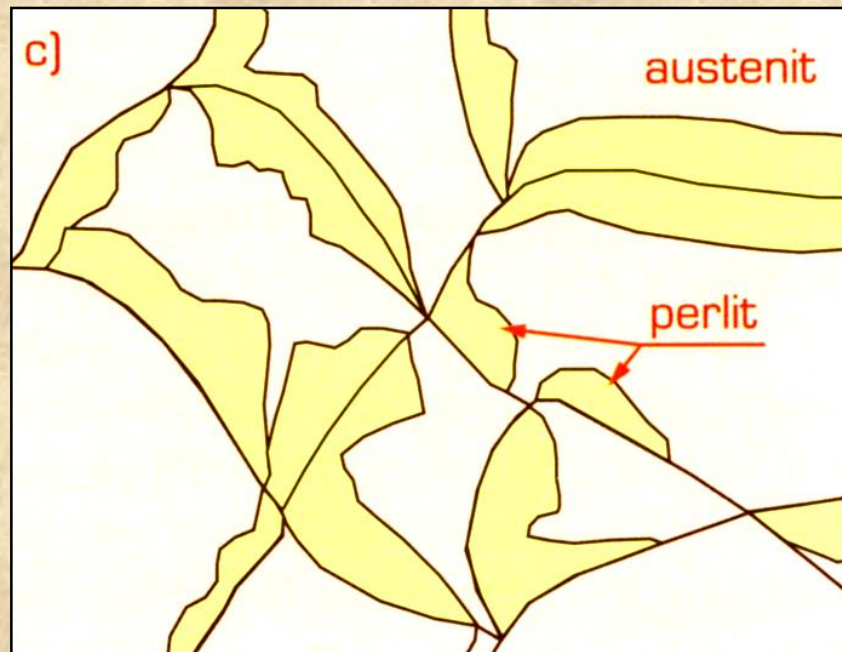
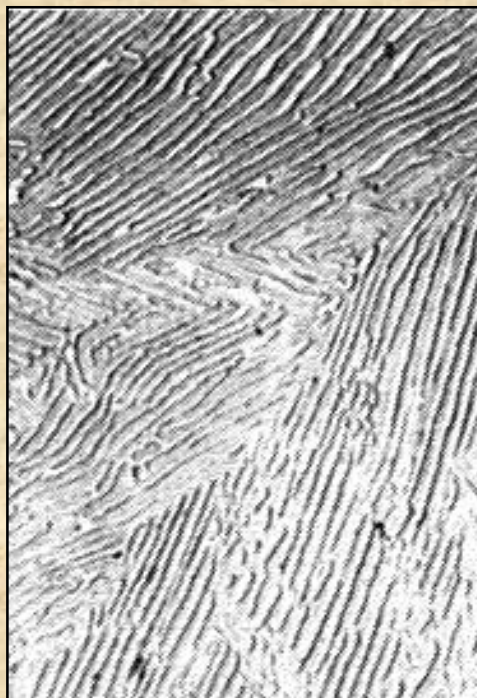
Proces kolejnego dobudowywania płytek  $Fe_\alpha$  i  $Fe_3C$  trwa aż do wyczerpania austenitu





**Zapoczątkowanie  
przemiany perlitycznej w  
ziarnach  
przechłodzonego  
austenitu**

**Wzrost kolonii perlitu  
odwzorowujących ziarna  
austenitu**

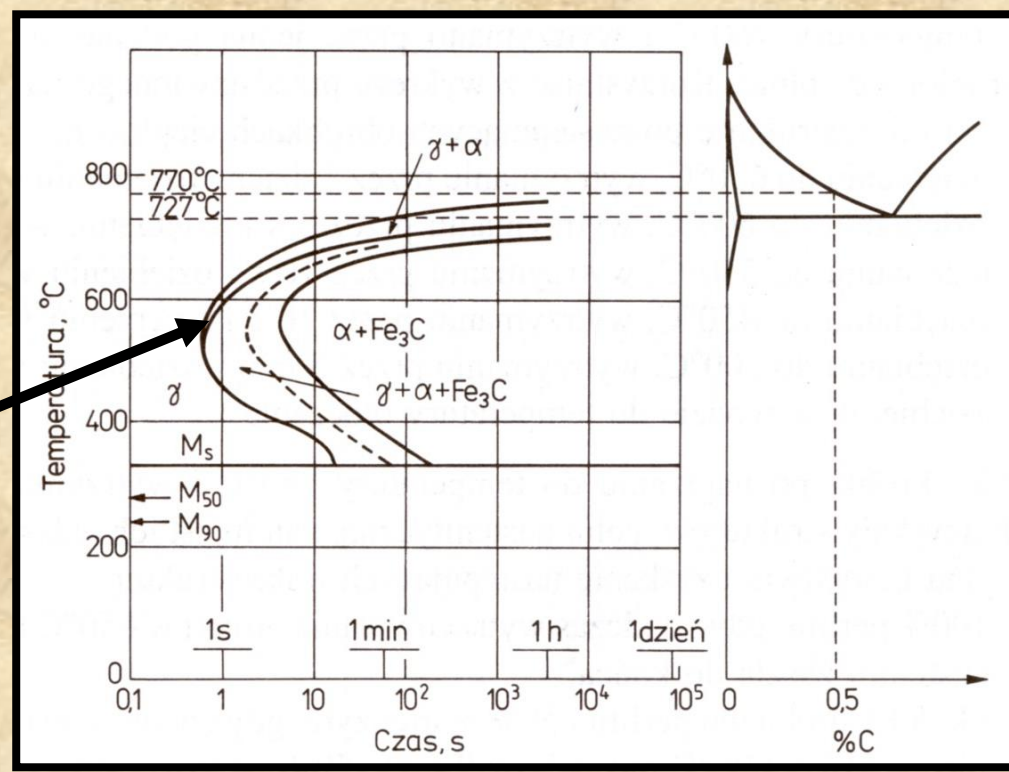


- **W stalach podeutektoidalnych** w zakresie temperatur  $A_3-A_1$  z austenitu wydziela się ferryt. Wydzielanie ferrytu prowadzi do zmiany składu austenitu wzdłuż linii, tym bardziej zbliżonej do linii GS, im bardziej przebieg wydzielania jest zbliżony do równowagowego.

- W temp. poniżej  $A_1$  a wyższych od temp. najmniejszej trwałości austenitu (wierzchołek krzywych CTP<sub>i</sub>, temp. 550°C), przemiana austenitu rozpoczyna się poprzez wydzielenie ferrytu na granicach ziaren austenitu.

- Ponieważ stężenie C w ferrycie jest niższe niż w austenicie (z którego się wydziela) rośnie zawartość C w  $Fe_\gamma$ .

- Po osiągnięciu wartości większej niż wynika z ekstrapolacji krzywej ES (graniczna rozpuszczalność węgla w austenicie) zaczyna się przemiana perlityczna prowadząca do przemiany pozostałego austenitu.



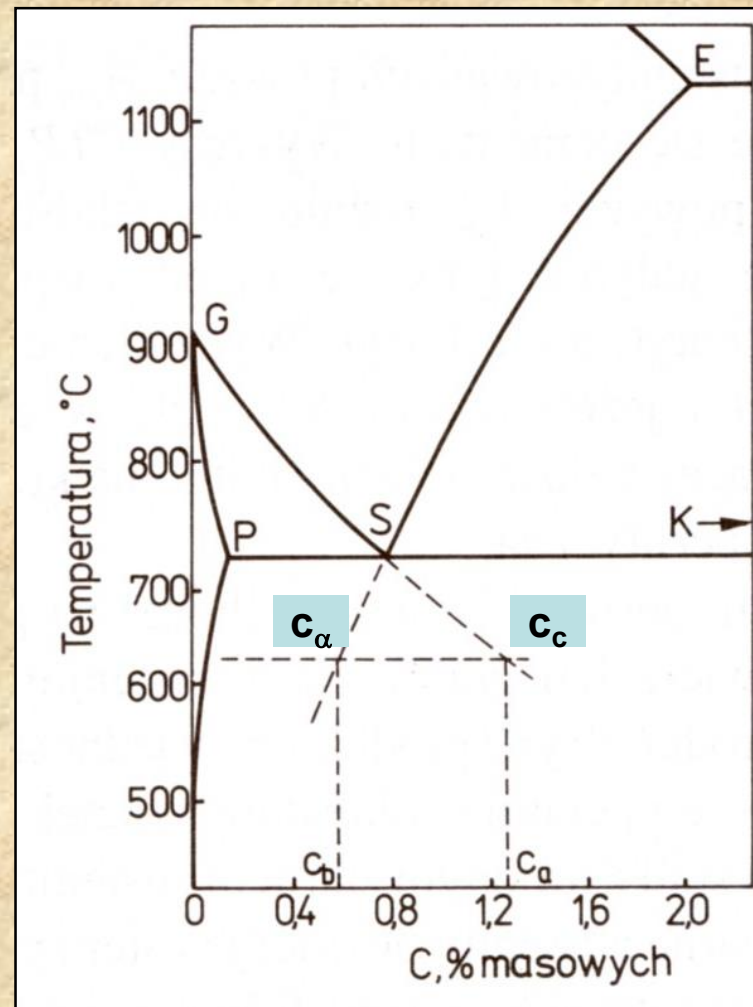
Wykres CTPi dla stali podeutektoidalnej zawierającej 0.5% C. **Powyżej 550°C przemianę austenitu w perlit poprzedza wydzielanie się ferrytu. Ilość wydzielonego ferrytu maleje z obniżaniem temperatury przemiany**



**Stal podeutektoidalna (0.5%C) zawiera w swojej strukturze perlit (ciemne obszary) oraz wydzielony - na granicach byłych ziaren austenitu - ferryt  $Fe\alpha$  (są to jasne obszary wyznaczające granice między ziarnami). Ilość wydzielonego ferrytu zależy od ilości węgla w stopie.**



- W stalach podeutektoidalnych (poniżej 0.77% C) przemianę austenitu w perlit poprzedza wydzielanie ferrytu
- W stalach nadeutektoidalnych (powyżej 0.77%C) przemianę austenitu w perlit poprzedza wydzielanie cementytu
- W temp. tuż poniżej 727°C perlit zawiera 0.77%C
- A zatem w perlicie tworzącym się w znacznie niższych temperaturach zawartość C zmienia się w szerokich granicach



**Ekstrapolacja Hultgerna – granice, w jakich może się zmieniać skład perlitu –** ekstrapolacja krzywych ograniczających zakres austenitu na wykres Fe-Fe<sub>3</sub>C poniżej punktu eutektoidalnego



- **W stalach nadeutektoidalnych (powyżej 0.77% C) przemianę austenitu w perlit poprzedza wydzielanie cementytu.**

Wykresy CTP<sub>i</sub> dla stali nadeutektoidalnych różnią się jakościowo od wykresów dla stali podeutektoidalnych tym, że przed rozpoczęciem przemiany perlitycznej wydziela się **cementyt** a nie ferryt.

Wydzielanie się Fe<sub>3</sub>C powoduje zubożenie austenitu w węgiel.

- Jeśli zawartość C w Fe<sub>γ</sub> zmniejszy się poniżej zawartości wynikającej z ekstrapolacji Hultgrena krzywej GC – rozpoczyna się przemiana perlityczna



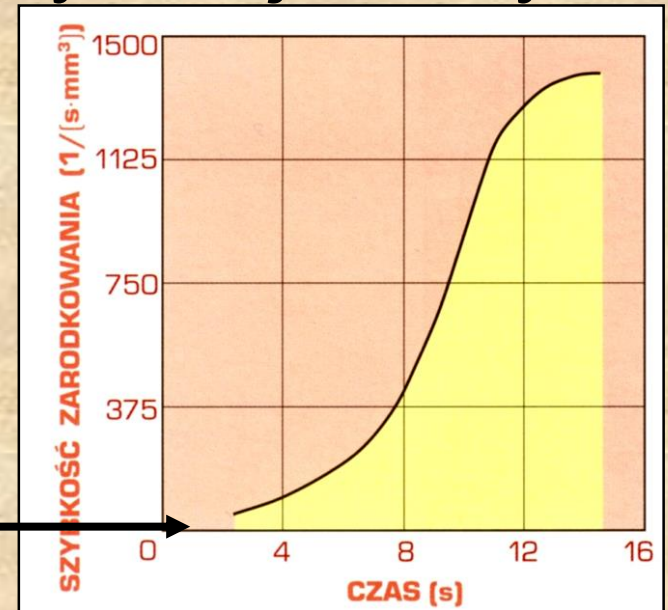
**Stal nadeutektoidalna (1.3%C) zawiera w swojej strukturze perlit (ciemne obszary) oraz wydzielony - na granicach byłych ziaren austenitu - cementyt Fe<sub>3</sub>C (są to jasne obszary wyznaczające granice między ziarnami). Ilość wydzielonego cementytu zależy od ilości węgla w stopie.**

- Zarodkowanie ferrytu, cementytu, perlitu i *bainitu* zachodzi na granicach ziaren austenitu ( $Fe\gamma$ ) → **ze wzrostem powierzchni granic ziaren austenitu (zmniejszenie się wielkości ziarna) rośnie liczba zarodków tych produktów w jednostce czasu.**
- Dlatego też czas potrzebny na to, aby w danej temperaturze określony ułamek austenitu uległ przemianie, jest krótszy w przypadku stali o drobnym ziarnie  $Fe\gamma$  niż dla stali o grubym ziarnie  $Fe\gamma$ :
- **drobne ziarno austenitu – korzystne!**
- Zmniejszenie wielkości ziarna  $Fe\gamma$  powoduje przesunięcie krzywych na wykresie CTP w kierunku krótszych czasów.



# Kinetyka przemiany perlitycznej

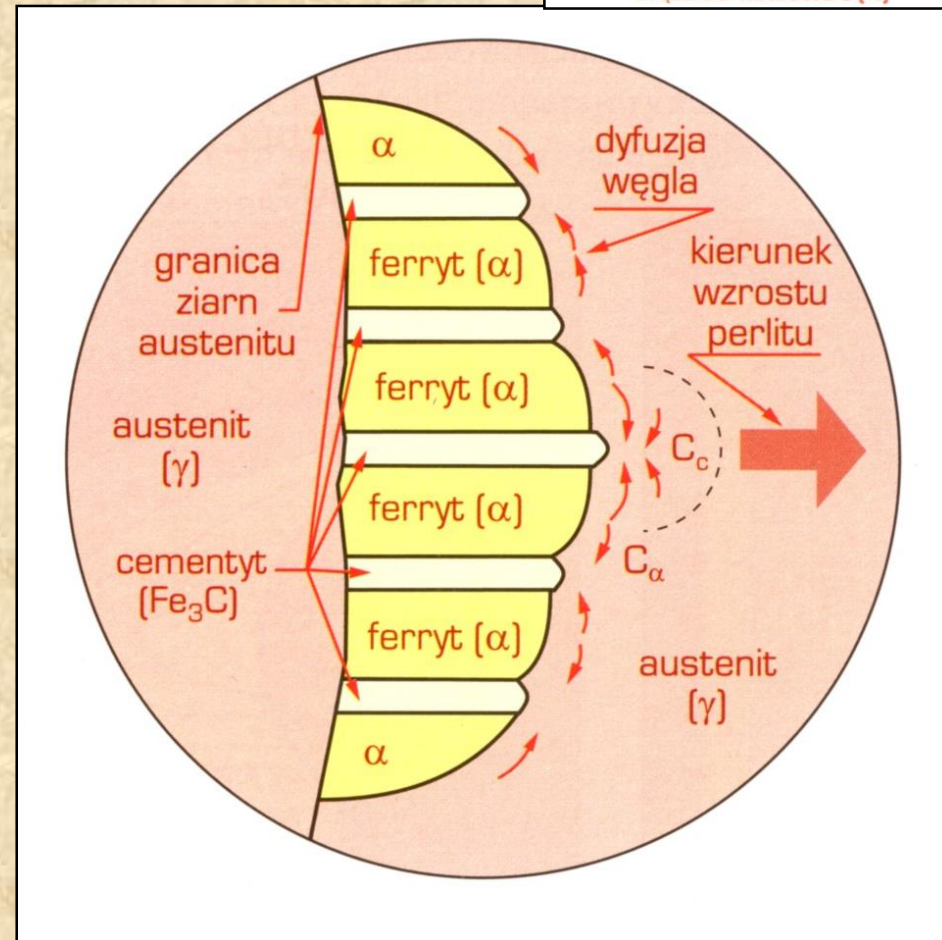
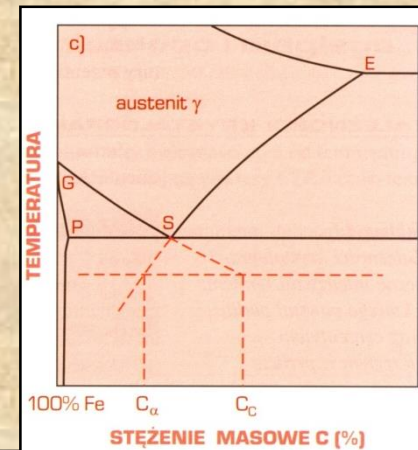
- Szybkość przemiany perlitycznej zależy od
  - Szybkości zarodkowania
  - Szybkości wzrostu.
- Funkcja szybkości zarodkowania perlitu jest nieliniowa i wykazuje okres inkubacyjny.
- Przy małych przechłodzeniach szybkość zarodkowania jest bardzo mała a szybkość wzrostu – bardzo duża – **tworzą się nieliczne kolonie perlitu o bardzo dużych rozmiarach**



Zależność szybkości zarodkowania od czasu przy przechłodzeniu stali eutektoidalnej do temp. 680°C

# Morfologia perlitu

- Utworzone kolonie perlitu mają kształt kulisty, gdyż szybkości dobudowywania nowych płytek i ich rozrostu czołowego są jednakowe.
- W wyniku dyfuzji C do płytek  $\text{Fe}_3\text{C}$  następuje zróżnicowanie składu chemicznego austenitu przed frontem przemiany. Przed płytkami  $\text{Fe}_3\text{C}$  stężenie C w  $\text{Fe}_\gamma$  wynosi  $C_c$  a przed płytkami ferrytu -  $C_\alpha$ .
- **Grubość płytek  $\text{Fe}_3\text{C}$  jest około siedmiokrotnie mniejsza od grubości płytek  $\text{Fe}_\alpha$ .**
- Przy stałej temperaturze grubości płytek każdej z faz perlitu są stałe i nie zależą od wielkości ziaren i jednorodności austenitu.
- Obniżaniu temperatury przemiany towarzyszy zmniejszanie się odległości pomiędzy płytkami perlitu.





# Krystalografia przemiany perlitycznej

Zarówno płytki cementytu  $\text{Fe}_3\text{C}$  jak i płytki ferrytu  $\text{Fe}_\alpha$  mogą wykazywać uprzywilejowaną orientację krystalograficzną względem austenitu  $\text{Fe}_\gamma$

Zależność	Równoległość płaszczyzn i kierunków	
Pitscha	$(001)\text{M}_3\text{C} \parallel \{522\}\gamma$	$[010]\text{M}_3\text{C} \parallel \langle 110 \rangle \gamma$
Pitscha	$(001)\text{M}_3\text{C} \parallel \{931\}\gamma$	$[010]\text{M}_3\text{C} \parallel \langle 311 \rangle \gamma$
Isaicheva	$(103)\text{M}_3\text{C} \parallel \{110\}\alpha \parallel \{111\}\gamma$	$[010]\text{M}_3\text{C} \parallel \langle 110 \rangle \alpha \parallel \langle 110 \rangle \gamma$
Pitscha-Schradera	$(001)\text{M}_3\text{C} \parallel \{521\}\alpha$	$[010]\text{M}_3\text{C} \sim 2,6^\circ \text{ od } \langle 311 \rangle \alpha$

Istota przemiany dyfuzyjnej austenitu polega na tym, że jej szybkość jest kształtowana przez szybkość dyfuzji węgla w austenicie ( $D_C^\gamma$ ) oraz szybkość zarodkowania nowych faz (węglików i ferrytu).

Siłą pędną przemiany jest różnica energii swobodnej ( $\Delta G$ ) austenitu i mieszaniny powstających faz.

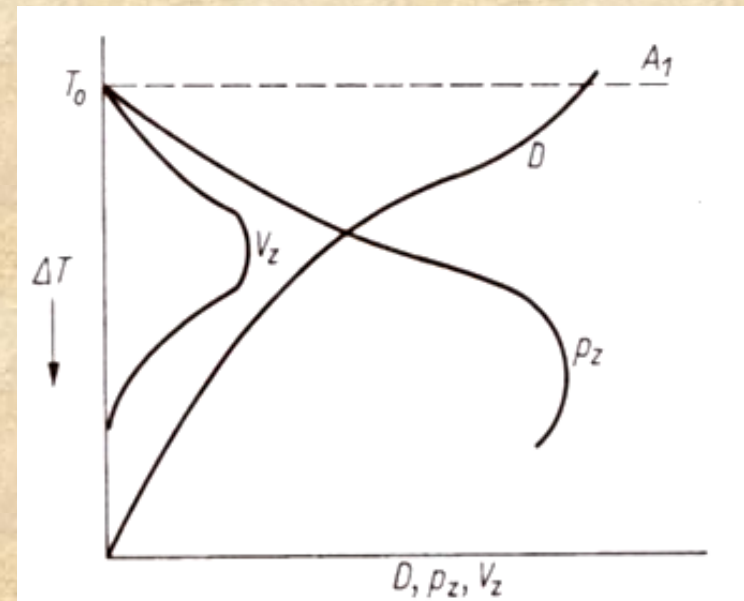
$\Delta G$  ma najmniejszą wartość tuż poniżej temp.  $A_1$  a  $D_C^\gamma$  tuż powyżej  $M_s$ , dlatego największa szybkość przemiany dyfuzyjnej austenitu jest osiągana pomiędzy tymi temperaturami, tj. przy ok.  $500^\circ\text{C}$

Jest to **temperatura najmniejszej trwałości austenitu w stalach węglowych!** Powyżej tej temperatury zachodzi przemiana dyfuzyjna (perlityczna), poniżej tej temperatury – bainityczna.

Uwaga! – na skutek małej szybkości dyfuzji węgla mogą nie zostać osiągnięte składy równowagowe i rozkład austenitu może nie zająć do końca.

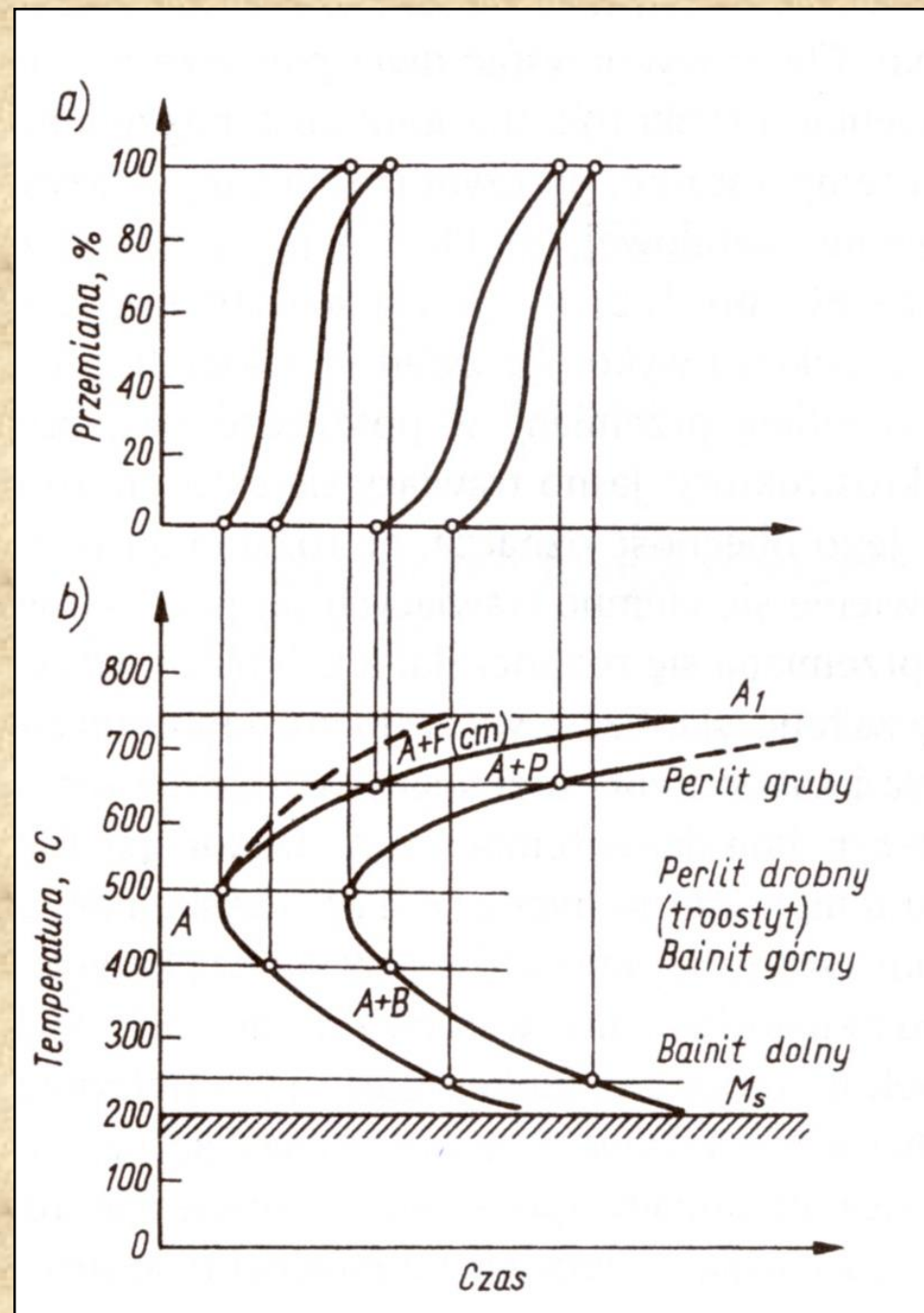
Zależność szybkości zarodkowania  $V_z$ ,  
współczynnika dyfuzji  $D$   
i prawdopodobieństwa zarodkowania  $\rho_z$   
od przechłodzenia  $\Delta T$

W miarę narastania różnicy energii swobodnej faz wyjściowej i nowej zwiększa się siła pędna przemiany i maleje wielkość krytycznego zarodka. Zmniejsza się jednak także dyfuzja, konieczna do przegrupowania atomów w celu utworzenia zarodka. Przy pewnym przechłodzeniu szybkość zarodkowania  $V_z$  będzie maksymalna!





- Wykres CTPi jest wykresem ilustrującym postęp przemiany austenitu w warunkach izotermicznych
- Na osi rzędnych – temperatura
- Na osi odciętych – czas
- Od góry wykres jest ograniczony linią  $A_1$ , od dołu linią  $M_s$  (początek przemiany martenzytycznej)
- Wykres tworzą dwie krzywe C
- Lewa oznacza początek przemiany (rozpad austenitu)
- Prawa oznacza koniec przemiany
- Na lewo od pierwszej krzywej istnieje austenit, pomiędzy krzywymi C: austenit + produkty jego rozkładu a na prawo od drugiej krzywej – tylko produkty rozkładu
- Pomiędzy  $A_1$  i temperaturą maksymalnej szybkości rozkładu będzie występował perlit, a poniżej - bainit.
- W temperaturze najmniejszej trwałości austenitu – troostyt (drobny perlit)
- W stalach podeutekoidalnych i nadeutekoidalnych przemianę perlityczną poprzedza wydzielanie ferrytu lub cementytu (linia przerywana)



Przebieg przemiany dyfuzyjnej austenitu jest analogiczny jak w przypadku wszystkich przemian dyfuzyjnych zachodzących przez zarodkowanie

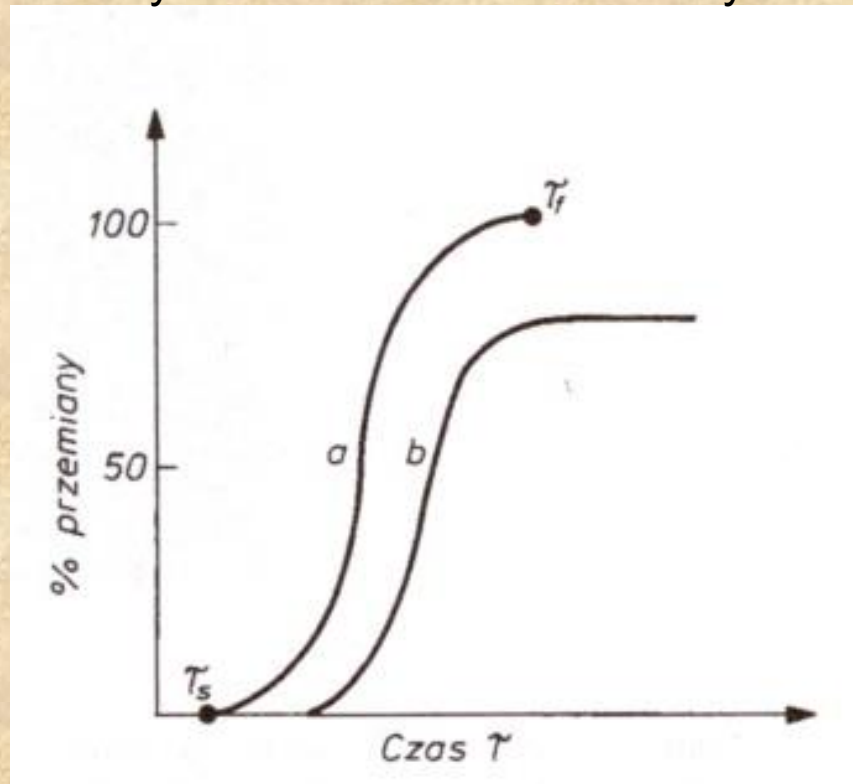
Jest opisywany za pomocą tzw. **krzywej S**

Oznacza to, że przemiana ta jest poprzedzona tzw. **okresem inkubacyjnym**, koniecznym po powstania trwałych zarodków przemiany

Następnie jej szybkość stopniowo wzrasta aż do osiągnięcia 50% przemiany  
A następnie stopniowo maleje.

Wpływ czasu na postęp przemiany w warunkach izotermicznych

- a) Przemiana perlityczna
- b) Przemiana bainityczna





## Jak się sporządza wykresy CTPi?

Metody: a) metalograficzna, b) pomiaru twardości

Dla a) i b): cienkie próbki (ok. 0.5 mm) austenitzujemy w odpowiedniej dla danej stali temperaturze, przenosimy je szybko do kąpeli izotermicznej (najlepiej metalowej, np. Pb, Sn), po czym wytrzymujemy je przez coraz dłuższe okresy (np. 1, 2, 3, 4, 5...s), a następnie oziębiamy w wodzie. Próbki składamy w pakiet i wykonujemy zgląd metalograficzny.

Po wytrawieniu należy śledzić przebieg przemiany w poszczególnych próbkach na podstawie mikrostruktury.

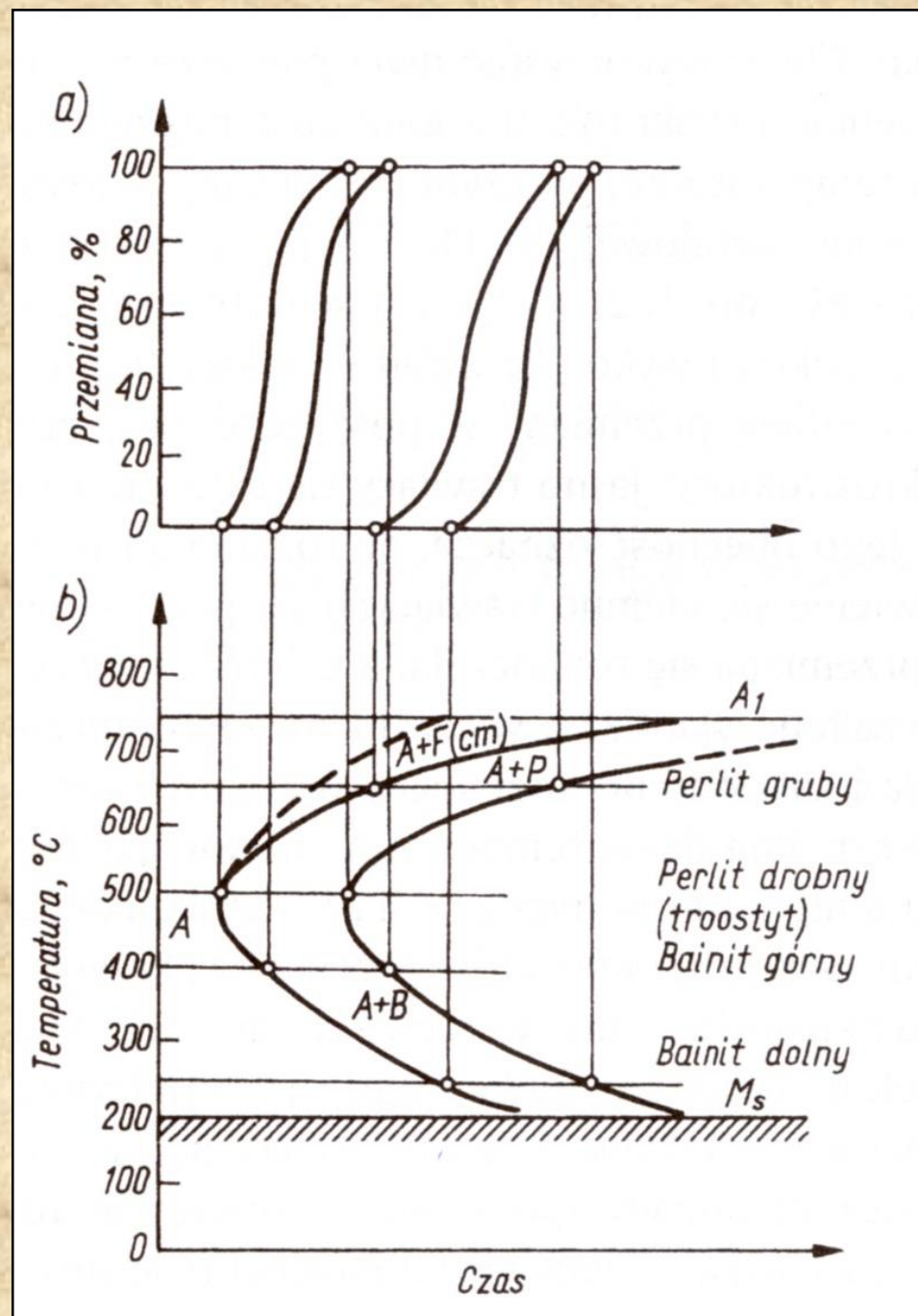
Jasno trawiący składnik to martenzyt (powstały z austenitu) Jego obecność oznacza, że rozkład austenitu jeszcze się nie rozpoczął.

Pojawienie się ciemno trawiących się produktów rozkładu austenitu oznacza, że przemiana się rozpoczęła a zniknięcie jasno trawiącego się składnika, że się zakończyła. Czasy wytrzymania izotermicznego, jakie upłynęły do rozpoczęcia i zakończenia przemiany w różnych temperaturach nanosimy na wykres „T- czas przemiany” na linii dla danej temperatury. Dokonując takiej procedury dla całego zakresu temperatur pomiędzy  $A_1$  i  $M_s$  uzyskujemy punkty początku i końca przemiany wykresu, przez które przechodzą krzywe C.

Próbki poddaje się dodatkowo badaniu twardości na aparacie Vickersa.

Nanosząc twardość próbek na wykres w funkcji czasu izotermicznego wytrzymania uzyskujemy odwrócone krzywe S, które pozwalają na wyznaczenie czasów początku i końca przemiany (początek w momencie rozpoczęcia spadku twardości (bo martenzyt), koniec z chwila osiągnięcia minimalnej twardości – produktu przemiany dyfuzyjnej)

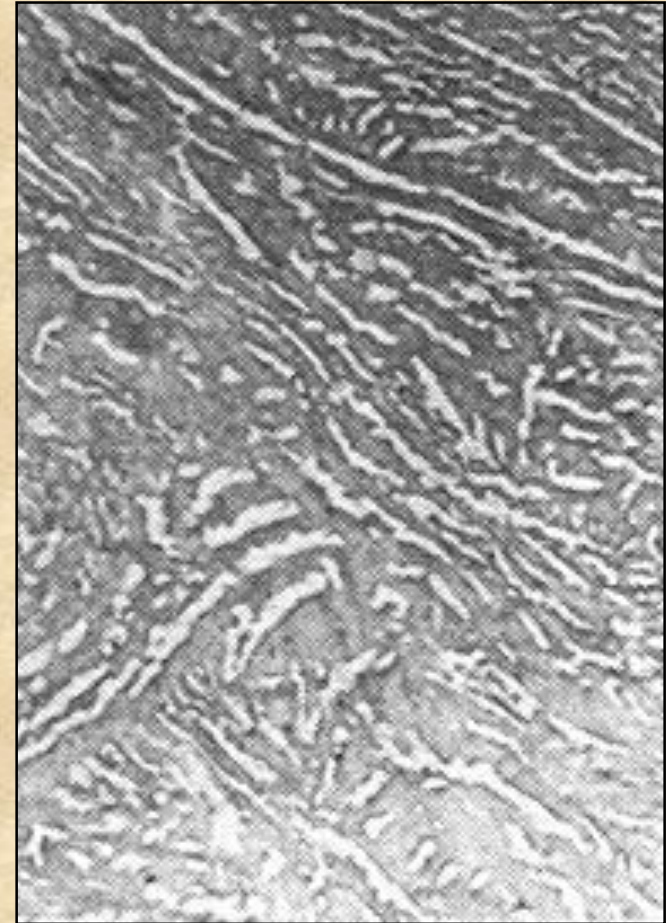
- W temperaturach nieznacznie poniżej wierzchołka na krzywych CTP, przemianę austenitu rozpoczyna tworzenie się **bainitu**, po czym część nieprzemienionego austenitu przemienia się w perlit.
- W przypadku jeszcze niższych temperatur austenit przemienia się w **BAINIT**.





# Przemiana bainityczna

- **Bainit** jest mieszaniną przesyconego ferrytu  $Fe_{\alpha}$  i cementytu  $Fe_3C$  oraz węglika  $\epsilon$   $Fe_{2.4}C$  o zawartości 8.4%C
- **Przemiana bainityczna** – przemiana austenitu w bainit **poniżej temperatury maksymalnej nietrwałości austenitu tj, poniżej 550°C**
- Przemiana ta wykazuje pewne cechy przemian dyfuzyjnych i bezdyfuzyjnych – jest to tzw. **przemiana pośrednia**



**Struktura bainitu** jest zróżnicowana morfologicznie w zależności od temperatury przemiany.

Stanowi mieszaninę ferrytu i węglików.

**Powyżej 400°C** składa się z cementytu i przesyconego węglem ferrytu (**bainit górny** „pierzasty”)

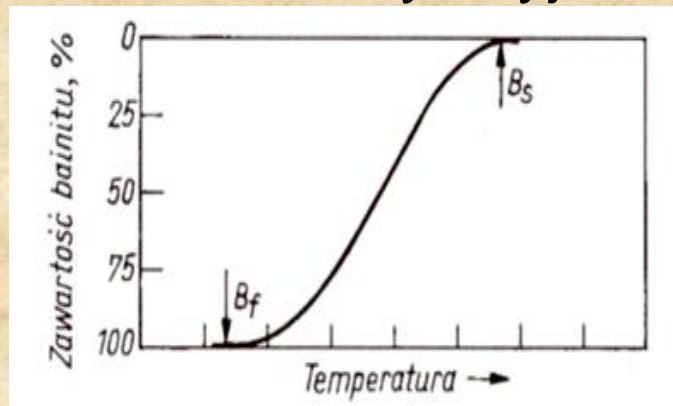
**Poniżej 400°C** składa się z węglika  $\epsilon$   $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$  i przesyconego węglem ferrytu (**bainit dolny** – „iglasty” – podobny do martenzytu)

**W bainicie dolnym – węgliki bardzo drobne, co zwiększa jego twardość.**



# Mechanizm przemiany bainitycznej

- Zarodkowanie bainitu (przesyconego ferrytu) rozpoczyna dyfuzyjne przemieszczanie się C w  $Fe_\gamma$  do granic ziaren i dyslokacji, tj w miejsca ubogie w C.
- Zachodzi poniżej  $550^\circ\text{C}$ , gdy siła napędowa przemiany jest duża, ale współczynnik dyfuzji mały.
- Zróżnicowanie składu chemicznego  $Fe_\gamma$  wymaga pewnego **czasu inkubacji** – niezbędnego do zainicjowania przemiany bainitycznej. W obszarach przechłodzonego austenitu o małym stężeniu C i wysokiej temperaturze  $M_s$  (temperatura początku przemiany martenzytycznej) zachodzi bezdyfuzyjna przemiana martenzytyczna



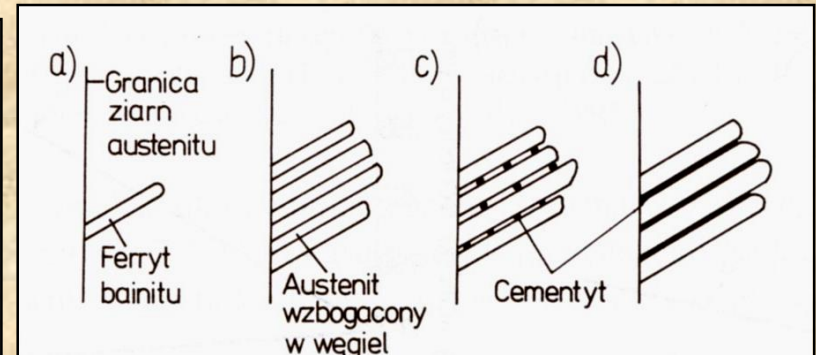
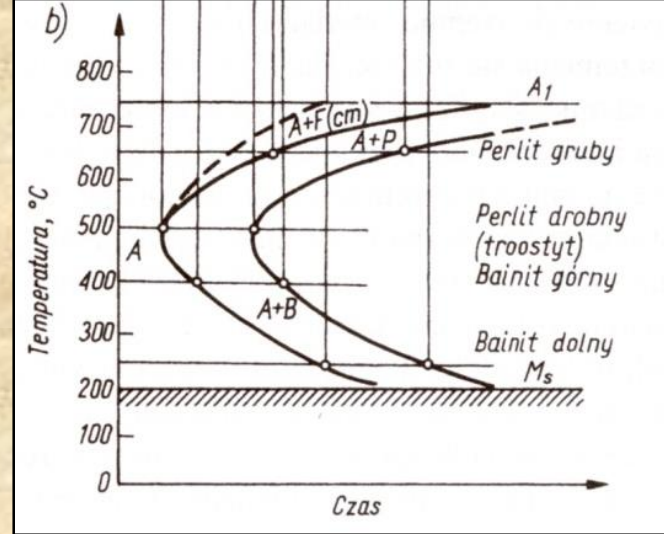
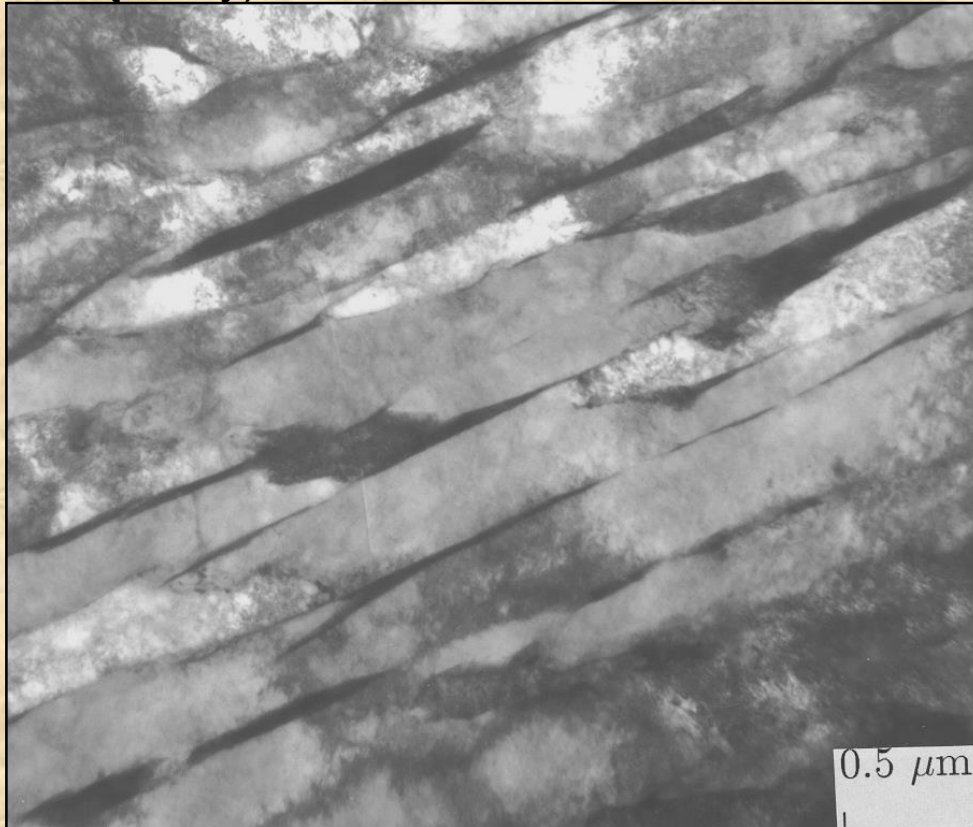
**Przemiana bainityczna cechuje się tym, iż na skutek małej szybkości dyfuzji węgla (bo temp. jest niska) nie mogą zostać osiągnięte składy równowagowe faz i rozkład austenitu nie zachodzi do końca. Tworzy się przesycony węglem ferryt + węgliki.**

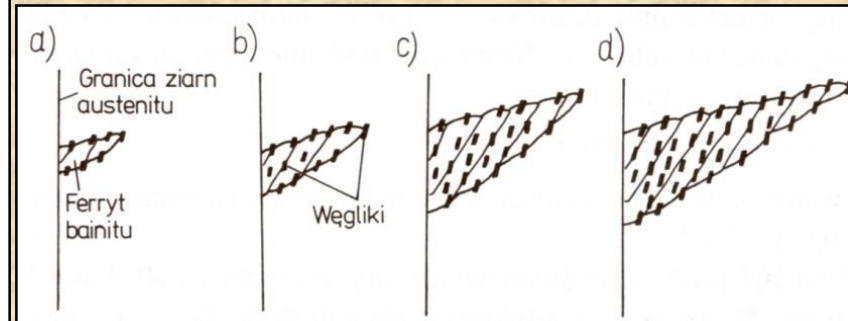
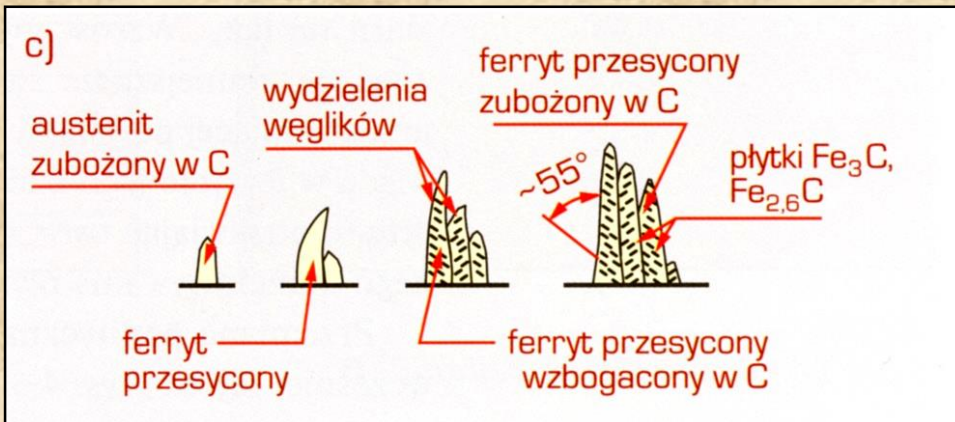
**Nieprzemieniony austenit po ochłodzeniu przemienia się w martenzyt.**



## Bainit górny powstaje w zakresie temp. 550°C-400°C

Składa się z ziaren przesyconego węglem ferrytu o szerokości ok. 0.5  $\mu\text{m}$  (nieregularne listwy), pomiędzy którymi znajduje się cementyt  $\text{Fe}_3\text{C}$  (a niekiedy  $\text{Fe}_\gamma$  wzbogacony w C – tzw. austenit szczątkowy)





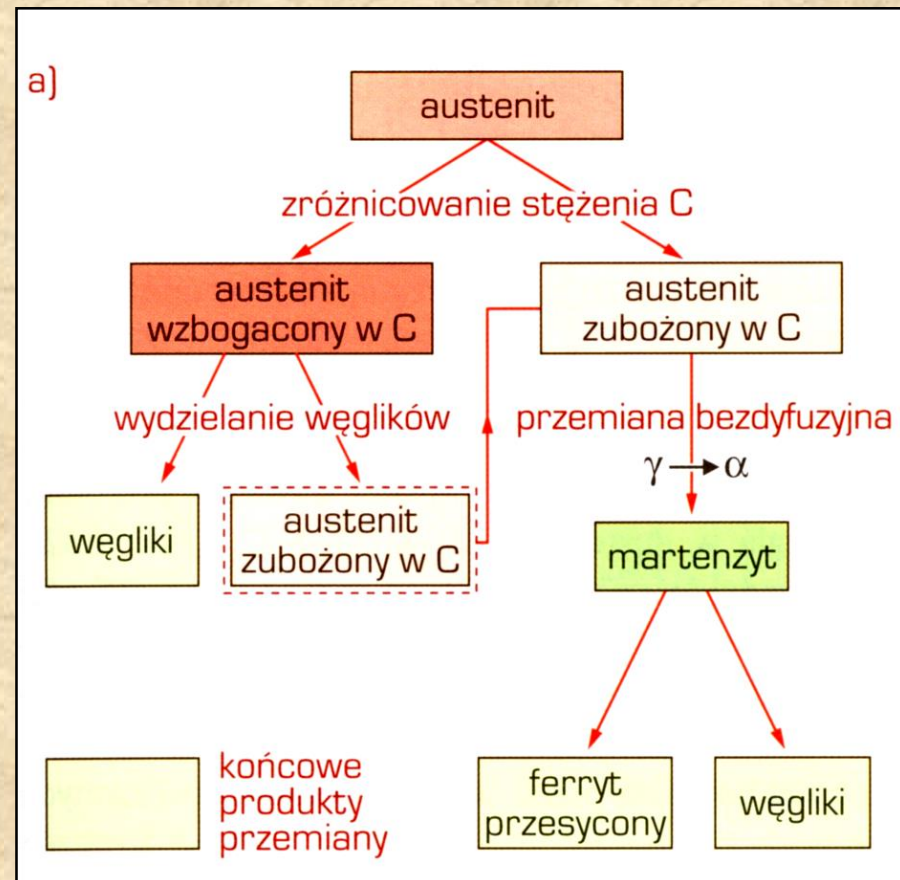
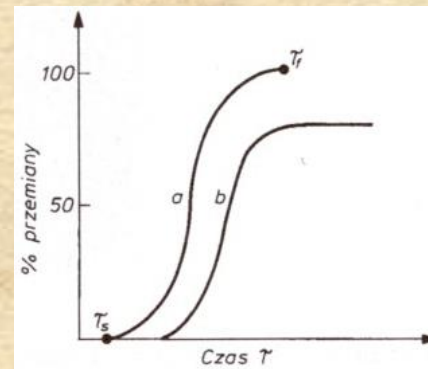
**Bainit dolny** powstaje w temp. poniżej  $400^\circ C$  – cechą charakterystyczną jest to, że **wzrost węglików zachodzi we wnętrzu płytek ferrytu bainitycznego.**

W miarę obniżania temperatury przemiany austenitu w bainit rośnie gęstość dyslokacji w ferrycie bainitu, jego przesylenie węglem oraz dyspersja węglików. **Bainit dolny składa się z ferrytu (w postaci listwowej, igieł) przesyconego węglem, płytkowych węglików o równoległych rzędach ściśle zorientowanych względem listew ferrytu oraz austenitu szczątkowego.**





- W obszarach  $Fe_\gamma$  o dużym stężeniu C następuje jednocześnie dyfuzyjny proces wydzielania bardzo drobnych cząsteczek  $Fe_3C$  o dużej dyspersji (ujawnia to tylko TEM).
- W wyniku tego tworzą się nowe obszary niskowęglowego  $Fe_\gamma$  ulegające następnie bezdyfuzyjnej przemianie martenzytycznej
- **Rozrost bainitu jest kontrolowany szybkością dyfuzji C w  $Fe_\gamma$ , a nie szybkością przemiany martenzytycznej.**



# Krystalografia przemiany bainitycznej

Zarówno ferryt bainityczny jak i austenit wykazują zależności krystalograficzne z wydzielonymi z nich węglnikami. Również między  $Fe_\gamma$  a  $Fe_\alpha$  w bainicie mogą występować orientacje krystalograficzne charakterystyczne dla przemiany martenzytycznej

Zależność	Równoległość płaszczyzn i kierunków	
Hoffmanna-Schumachera	$\{111\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha$	$\langle 211 \rangle_\gamma \parallel \langle 110 \rangle_\alpha$
Kurdjumowa-Sachsa	$\{111\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha$	$\langle 110 \rangle_\gamma \parallel \langle 111 \rangle_\alpha$
Pitscha	$(001)M_3C \parallel \{522\}_\gamma$	$[010]M_3C \parallel \langle 110 \rangle_\gamma$
Pitscha-Schradera	$(001)M_3C \parallel \{521\}_\alpha$	$[010]M_3C \sim 2,6^\circ \text{ od } \langle 311 \rangle_\alpha$
Bagariackiego	$(001)M_3C \parallel \{211\}_\alpha$	$[010]M_3C \parallel \langle 110 \rangle_\alpha$