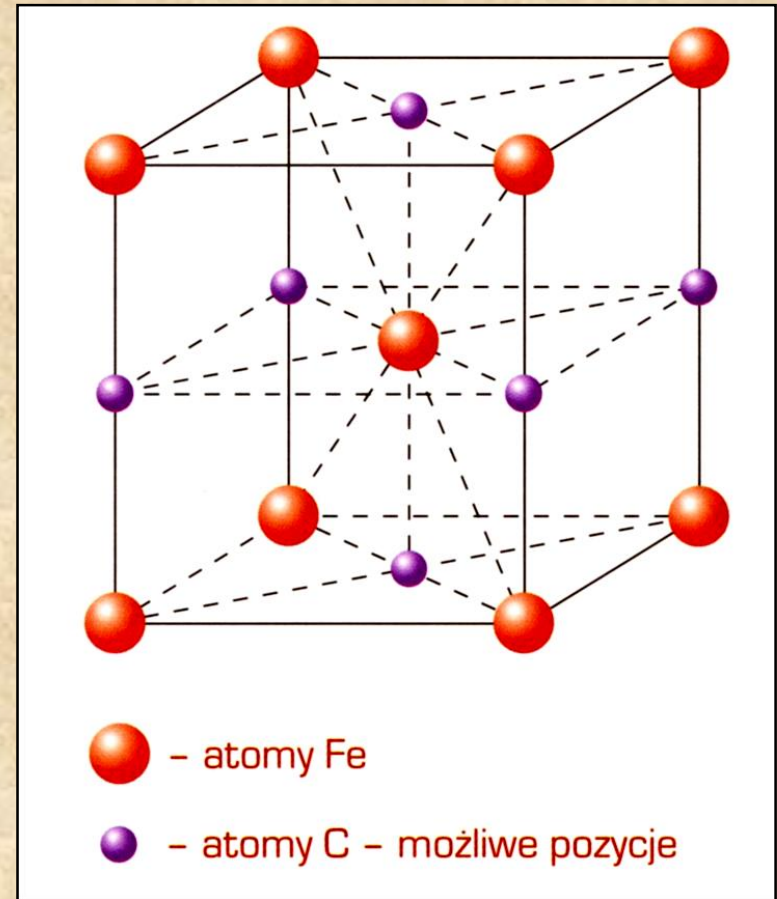


Przemiana martenzytyczna

- Przemiana martenzytyczna jest przemianą **bezdyfuzyjną (atermiczną)** – do jej realizacji nie jest wymagane wzbudzenie cieplne atomów.
- Zachodzi przy **dużym przechłodzeniu** austenitu do temp. M_s (temperatury początku przemiany – dla stali poniżej 200°C).
- Produktem przemiany jest **martenzyt** (dla stali przesycony roztwór węgla w żelazie α) produkt **przemiany bezdyfuzyjnej**.



W przebiegu przemiany martenzytycznej CZAS nie ogrywa żadnej roli!!!

Warunkiem zajścia jest chłodzenie austenitu:

1. z szybkością większą od krytycznej (dla uniknięcia przemiany dyfuzyjnej)

2. poniżej temperatury początku przemiany martenzytycznej M_s .

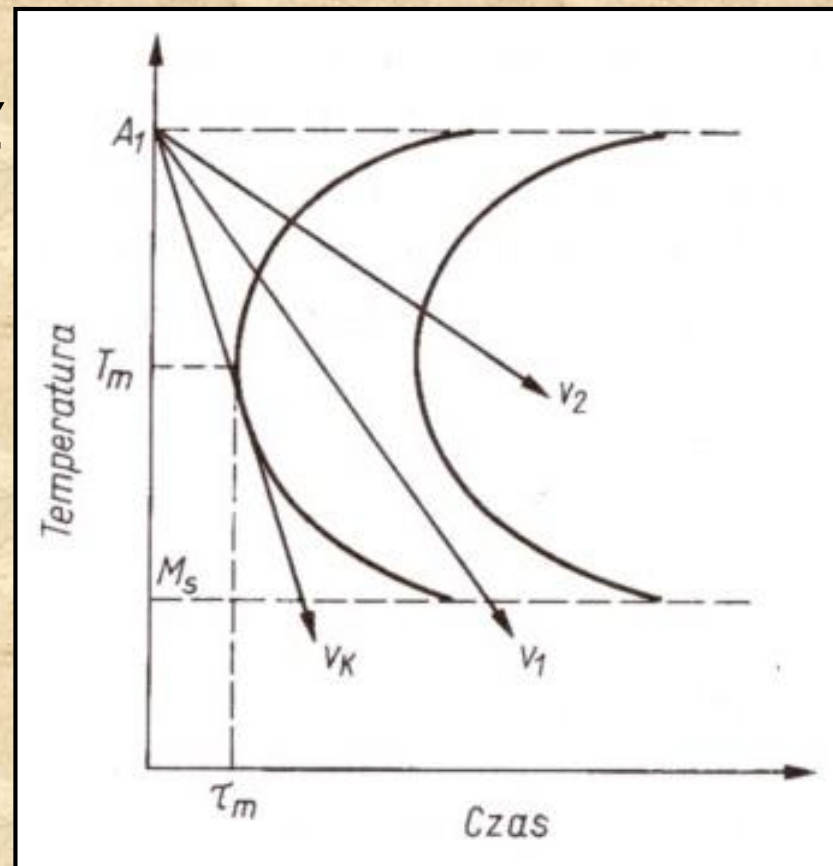
Przemiana rozpoczyna się natychmiast po ochłodzeniu (nie ma okresu inkubacyjnego) i przebiega z szybkością 7000 m/s – czas utworzenia jednej płytki 10^{-7} s!!!

Kończy się w temperaturze końca przemiany M_f .

Krytyczna szybkość chłodzenia

Wyraża ją styczna do krzywej początku przemiany.

Krytyczna szybkość przemiany to szybkość zabezpieczająca przed wystąpieniem przemian dyfuzyjnych, które zachodzą w wyższych temperaturach niż przemiana martenzytyczna i (rozkładając austenit) uniemożliwiają jego przemianę w martenzyt.



Krytyczna szybkość chłodzenia V_K określona za pomocą wykresu CTPi

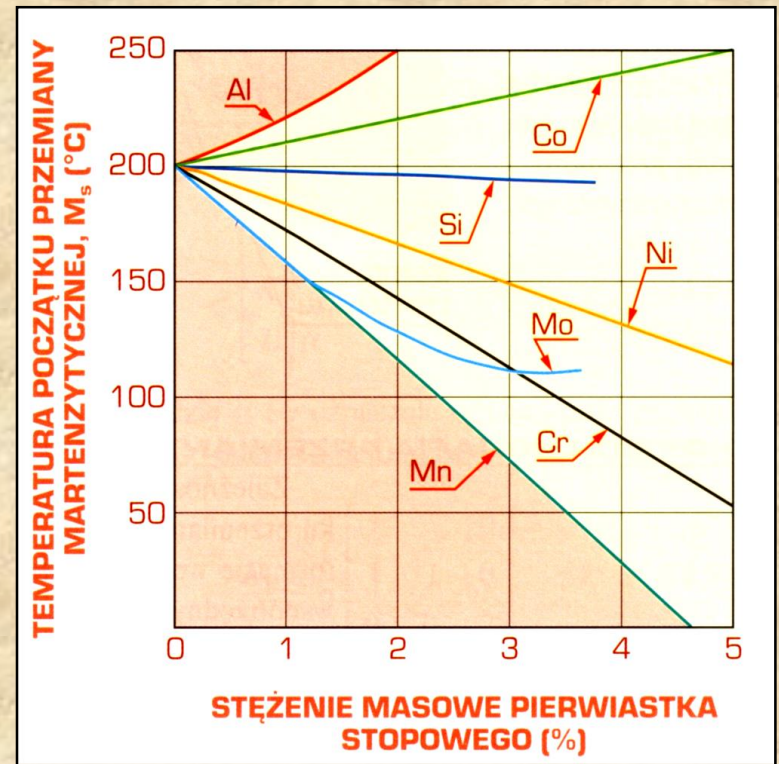
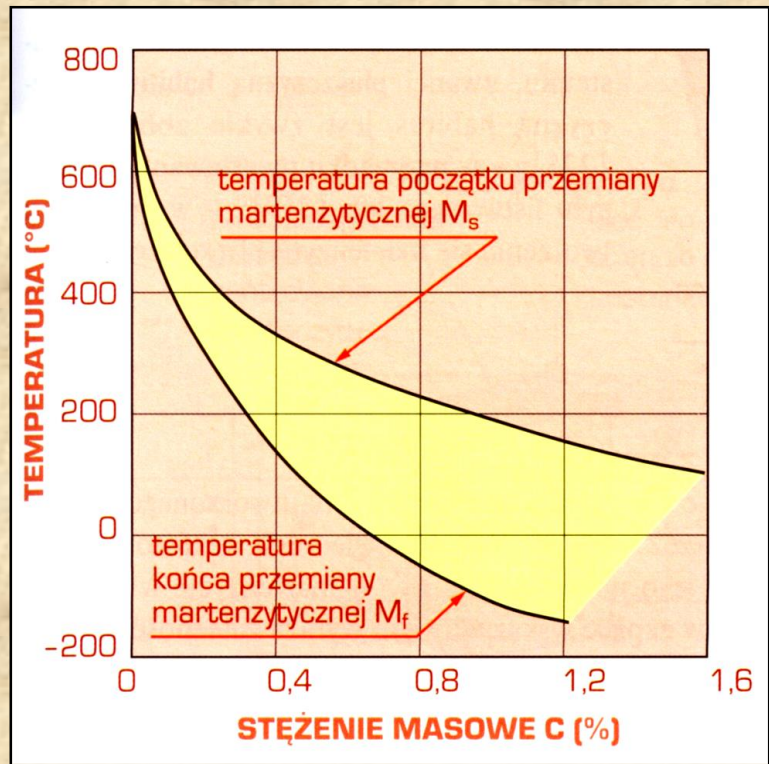
- Przemiana martenzytyczna zachodzi pod **warunkiem ciągłego obniżania temperatury w zakresie temp. M_s** (temperatura początku przemiany) **do temp. M_f** (temperatura końca przemiany)

Wartości M_s i M_f zależą od składu chemicznego austenitu

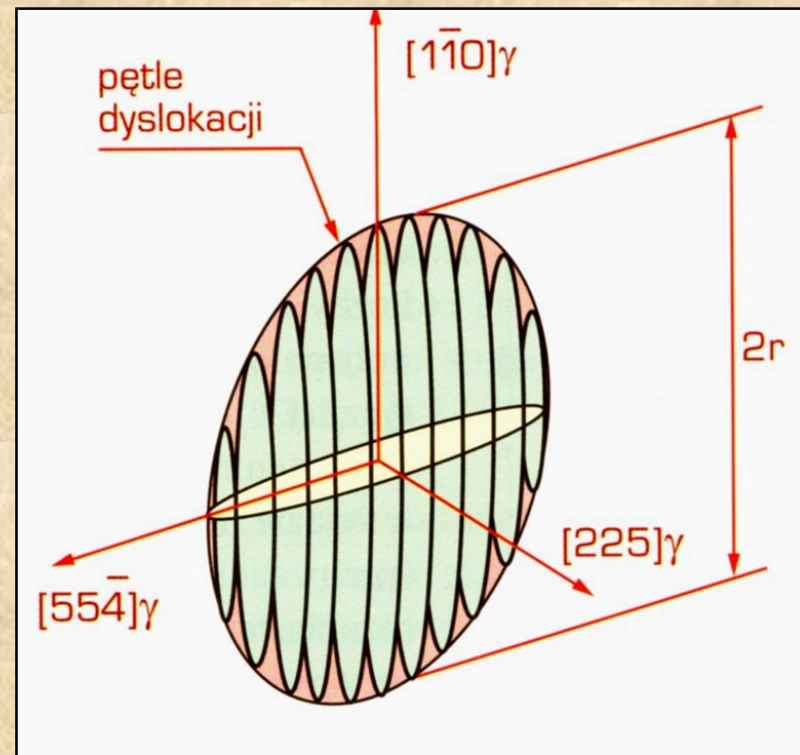
Zwiększenie zawartości **C** w Fe_γ obniża temp. M_s i M_f

Zwiększenie zawartości dodatków stopowych **Mn, Cr, Mo, Ni** obniża temp. M_s i M_f

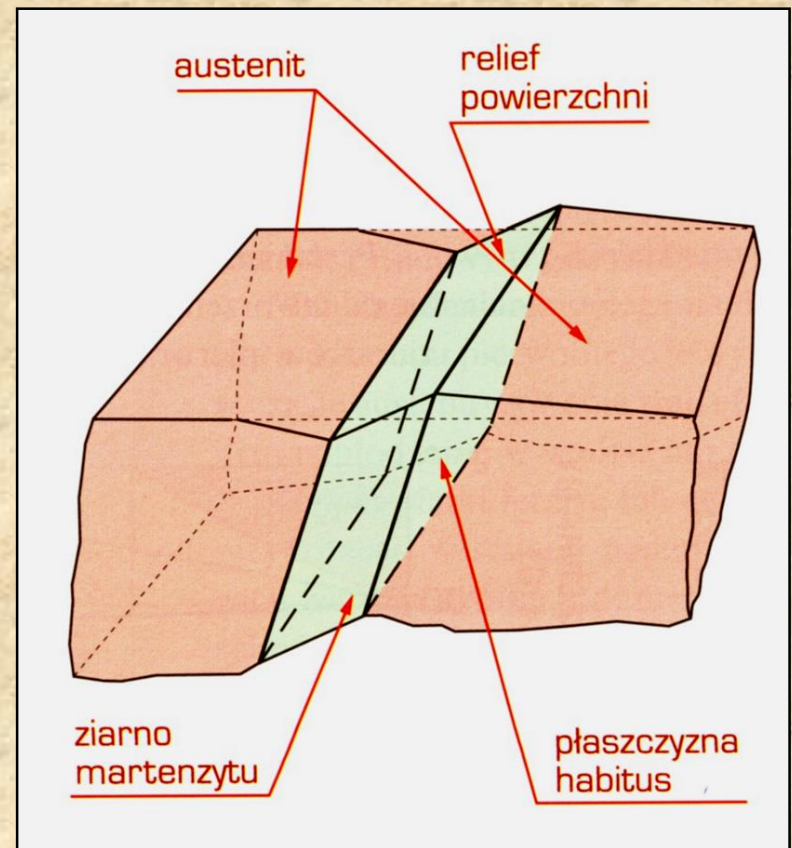
Zwiększenie zawartości dodatków stopowych **Al i Co** w Fe_γ podwyższa temp. M_s i M_f



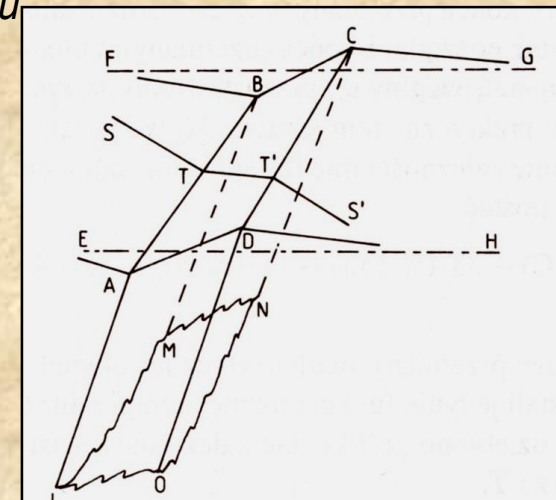
- Przemiana martenzytyczna rozpoczyna się od utworzenia w austenicie **embrionów**, tj. zarodków pierwotnych, którymi mogą być: błędy ułożenia, źródła Franka-Reada, defekty sieciowe (pętle dyslokacyjne) i równoległe ułożone dyslokacje
- Zarodkami przemiany martenzytycznej są **embriony**, które przekraczają wielkość krytyczną. Z upływem czasu przemiany następuje **autokataliza** polegająca na przyspieszeniu zarodkowania. Tworzące się zarodki odkształcają otaczającą osnowę i sprzyjają powstawaniu nowych zarodków.



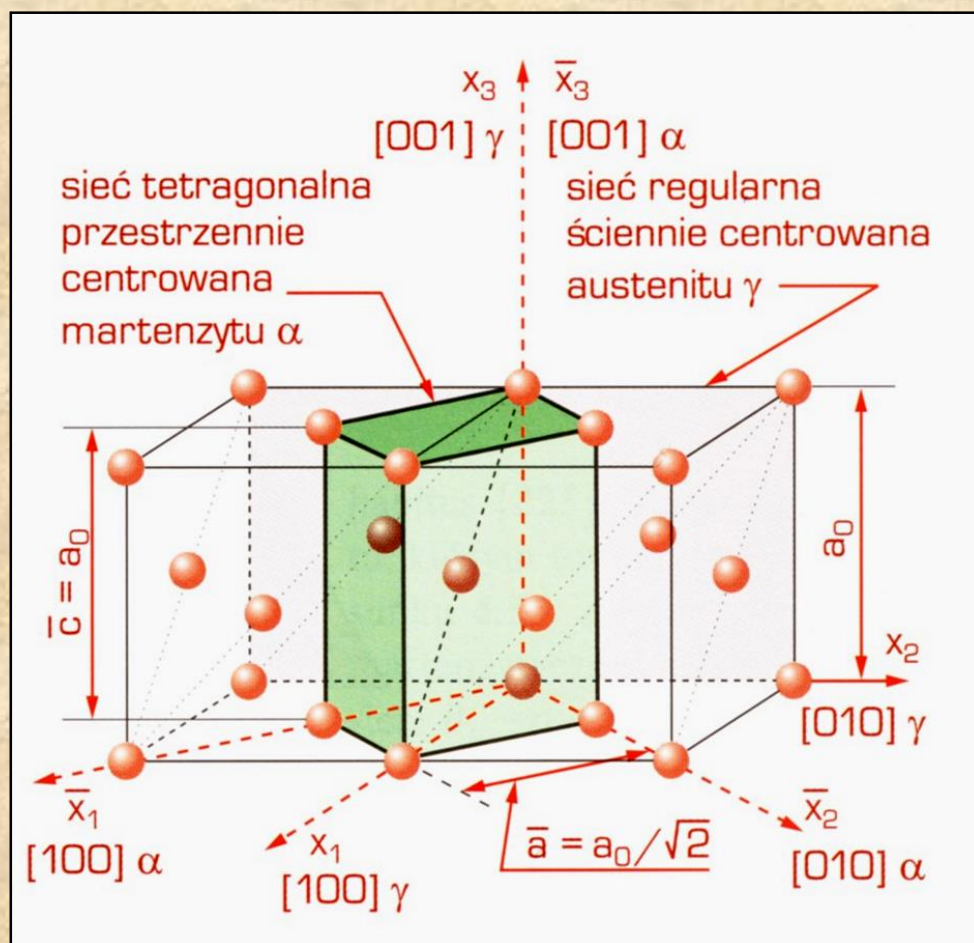
- Podczas przemiany martenzytycznej następuje **skoordynowane przemieszczanie atomów bez wymiany sąsiadujących atomów** dziedziczonych z austenitu (nie ma dyfuzji!!!).
- Wszystkie atomy podlegają małym przemieszczeniom o **ułamek** odległości międzyatomowej względem atomów sąsiednich.
- W wyniku tego następuje **charakterystyczny relief** powierzchni martenzytu związany z nachyleniem powierzchni odpowiadających każdej płytce lub listwie martenzytu.

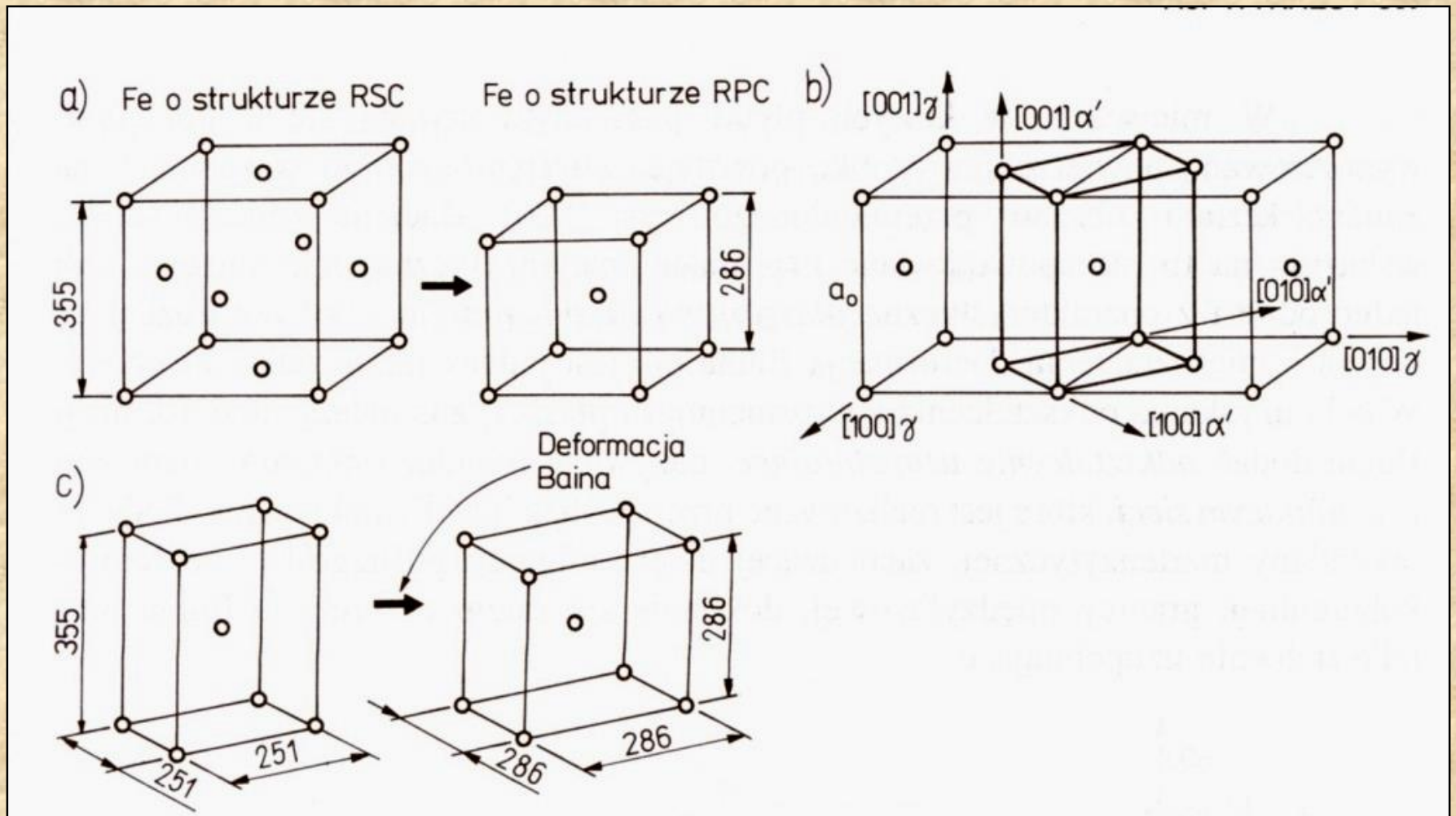


Zmiana kształtu gładkiej powierzchni przez płytkę martenzytu. **Naniesiona rysa STT'S'.** Uprzednio polerowana powierzchnia FG i EH



W wyniku przemiany austenitu o sieci regularnie ściennie centrowanej f.c.c. powstaje martenzyt o sieci tetragonalnej przestrzennie centrowanej





Kolejne stadia przekształcania sieci A1 austenitu w sieć tetragonalną przestrzennie centrowaną martenzytu
Deformacja Baina komórki austenitu w komórkę martenzytu (wymiary w pm)

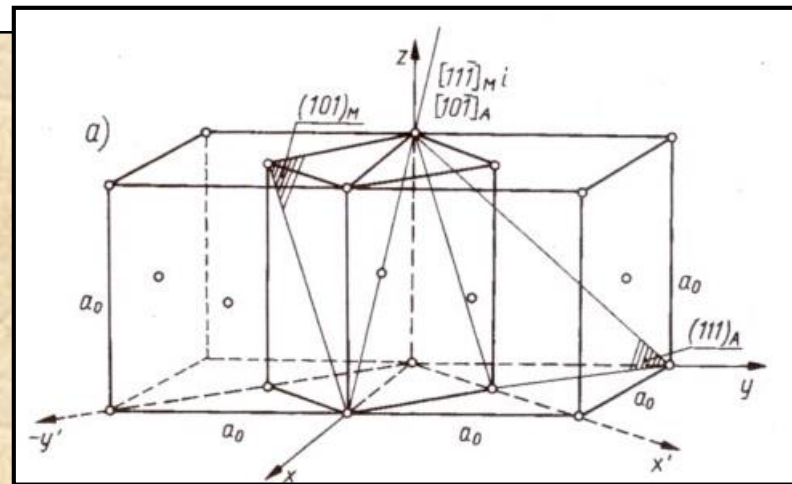
Podczas deformacji Baina następuje

- zmniejszenie komórki w kierunku $[001]$ o 19.5%
- wydłużenie komórki w kierunkach $[100]$ i $[010]$ o 13%.

Zależności krystalograficzne pomiędzy martenzytem a austenitem

Zależność	Równoległość płaszczyzn i kierunków	
Baina	$\{100\}_\gamma \parallel \{100\}_\alpha$	$\langle 110 \rangle_\gamma \parallel \langle 100 \rangle_\alpha$
Kurdjumowa-Sachsa	$\{111\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha$	$\langle 110 \rangle_\gamma \parallel \langle 111 \rangle_\alpha$
Nishiyamy	$\{111\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha$	$\langle 211 \rangle_\gamma \parallel \langle 110 \rangle_\alpha$
Greningera-Troiano	$\{111\}_\gamma \sim 1^\circ$ od $\{110\}_\alpha$	$\langle 110 \rangle_\gamma \sim 2^\circ$ od $\langle 111 \rangle_\alpha$

Podczas przemiany martenzytycznej występuje proces ścinania w dwóch różnych kierunkach krystalograficznych, co prowadzi do powstania określonych zależności orientacji pomiędzy austenitem i martenzytem zwanej zależnością Kurdjumowa – Sachsa.

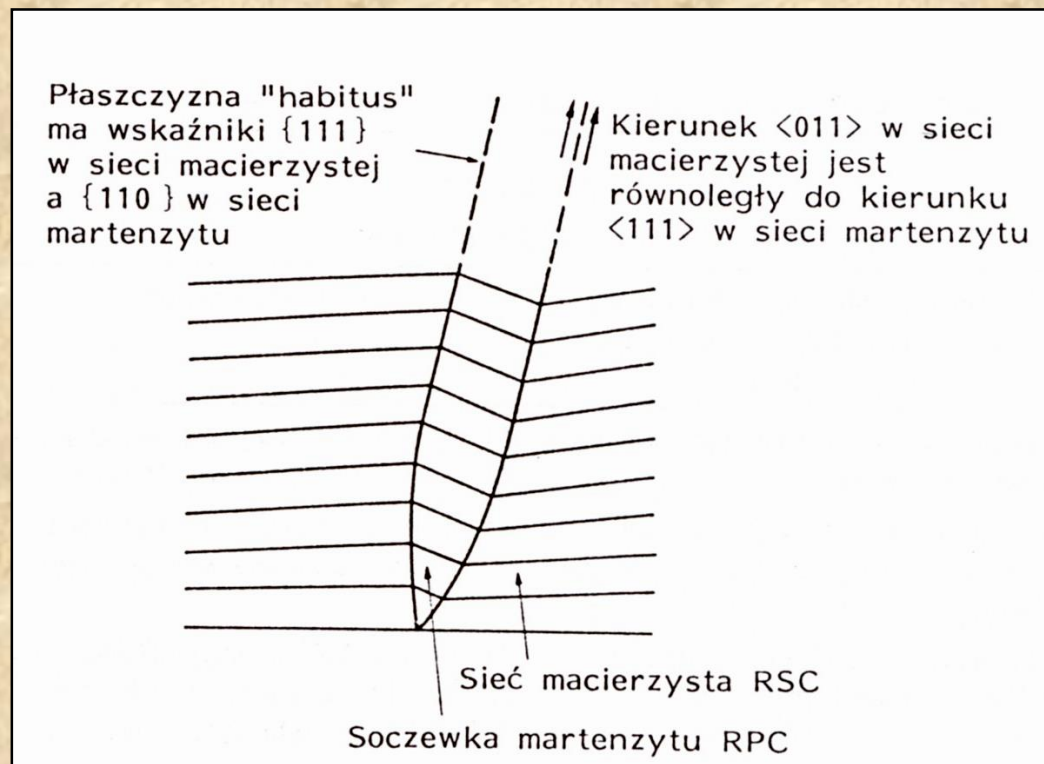


Zależność ta polega na tym, że płaszczyzny (101) martenzytu ustawiają się równolegle do płaszczyzn (111) austenitu, a kierunki [11-1] martenzytu ustawiają się równolegle do kierunków [10-1] austenitu.

Mechanizm ścinania prowadzi do wystąpienia płaszczyzny „habitus”, która nie ulega zniekształceniu i nie zmienia swojej orientacji w przestrzeni.

Martenzyt jest koherentny z siecią macierzystą. Aby spowodować jak najmniejsze zakłócenie tej sieci, rośnie on w postaci cienkich soczewek wzdłuż określonych płaszczyzn i kierunków

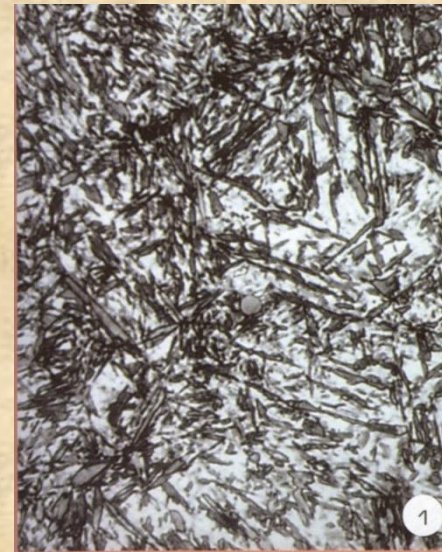
Granice ziaren martenzytu są położone wzdłuż tej nieodkształconej i nieulegającej obrotowi płaszczyzny austenitu: **płaszczyzna „habitus”**



**Zależności krystalograficzne dotyczą
CZYSTEGO Fe**

- W wyniku przemiany martenzytycznej w stalach mogą utworzyć się dwa rodzaje martenzytu:
 1. **Listwowy** (masywny) - kryształy mają kształt listew równoległych do $\langle 111 \rangle_M$ o szerokości 0.1 - 3 μm .
Są oddzielone granicami ziaren małego kąta i między listwami jest **brak austenitu szczątkowego**
 2. **Płytkowy** (zbliźniaczony, iglasty) składa się z płytek mających kształt soczewek o różnych wielkościach, oddzielonych **austenitem szczątkowym**

- **Martenzyt listwowy (masywny)** powstaje we wszystkich stopach Fe z pierwiastkami stopowymi; odkształcenie zachodzi w wyniku poślizgu, duża gęstością dyslokacji wewnątrz krystalitów (10^{15} - 10^{16}m^{-2}) wykazujących najczęściej podstrukturę dyslokacyjną.
- Pojedynczy krystalit na kształt listwy o szerokości 0.1 - 3.0 μm i stosunku wymiarów ok. 1:7:30. Listwy tworzące się w kierunku $\langle 111 \rangle$ martenzytu układają się równolegle względem siebie tworząc tzw. **pakiety**.
- Sąsiadujące listwy oddzielone są LAGBs, natomiast pakiety oddzielone są HAGBs o orientacji bliźniaczej ($\langle 111 \rangle 60^\circ$).

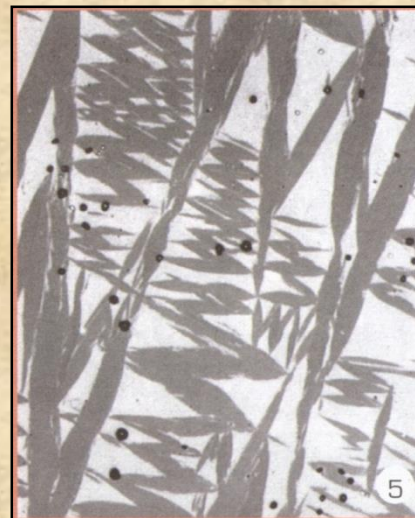


Struktura martenzytu listwowego, pow. 680 x, m.o.

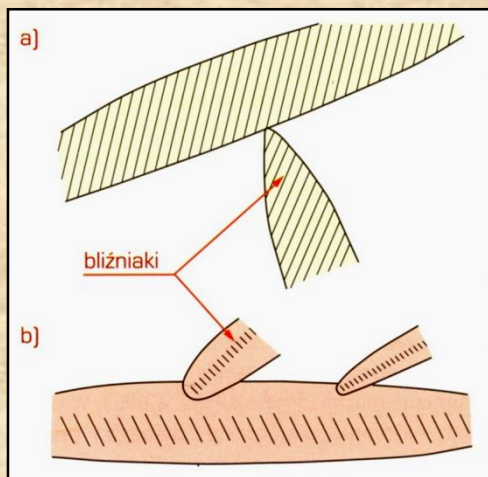


Struktura martenzytu listwowego z płytkowymi wydzieleniami Fe_3C wewnątrz listew, pow. 19 000 x, TEM

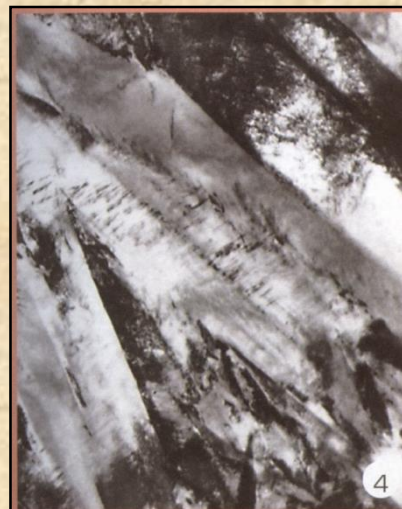
- **Martenzyt płytkowy (zbliżniaczony, iglasty)** powstaje w wysokowęglowych stopach Fe w ściśle określonych zakresach stężenia pierwiastków stopowych;
- Kryształy martenzytu mają kształtek płytek zbliżonych do soczewek o powierzchni w różnym stopniu nieregularnej w zależności od stopnia zbliźniaczenia. Wielkość płytek jest zróżnicowana, gdyż postają **niezależnie**.
- Płytki martenzytu mogą być całkowicie (a) lub częściowo zbliźniaczone (b)



Struktura martenzytu płytkowego, pow. 200 x, m.o.



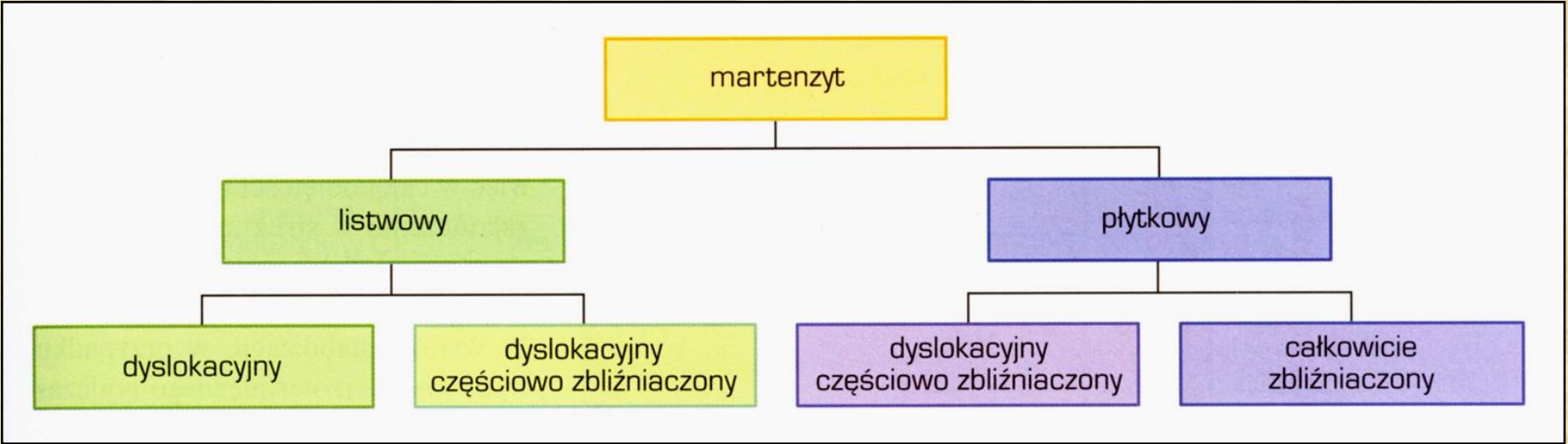
- W martenzycie częściowo zbliźniaczonym środkowa część płytki powstaje w postaci drobnych, równoległych bliźniaków przemiany zwanych **mitribem**.



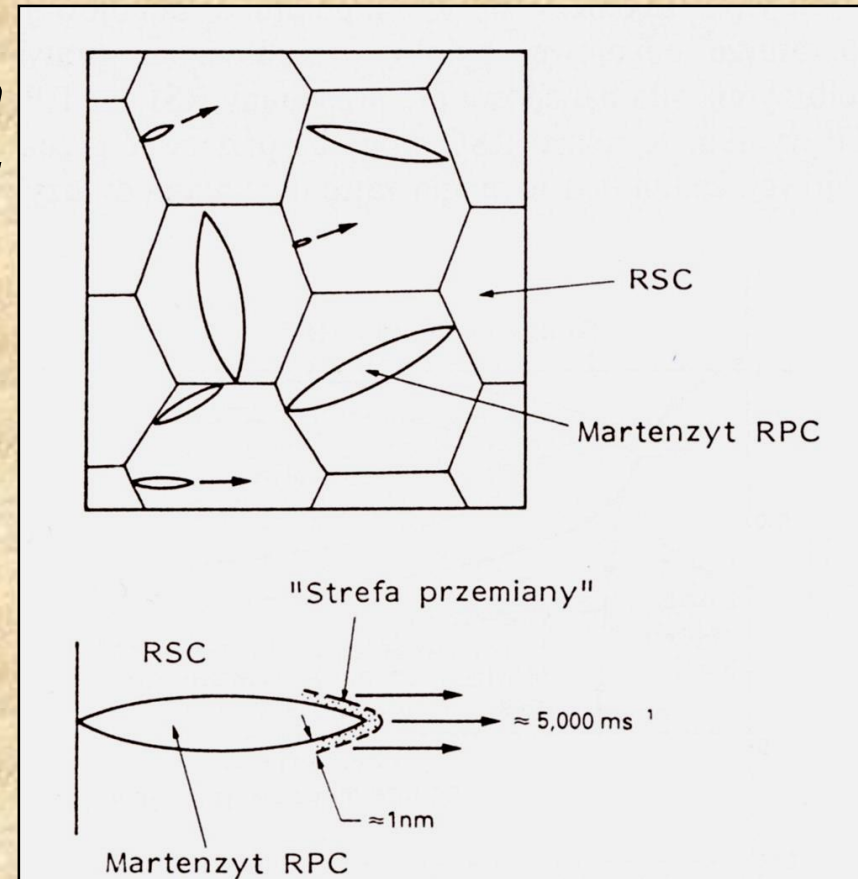
Struktura martenzytu płytkowego częściowo zbliźniaczonego pow. 30 000x TEM

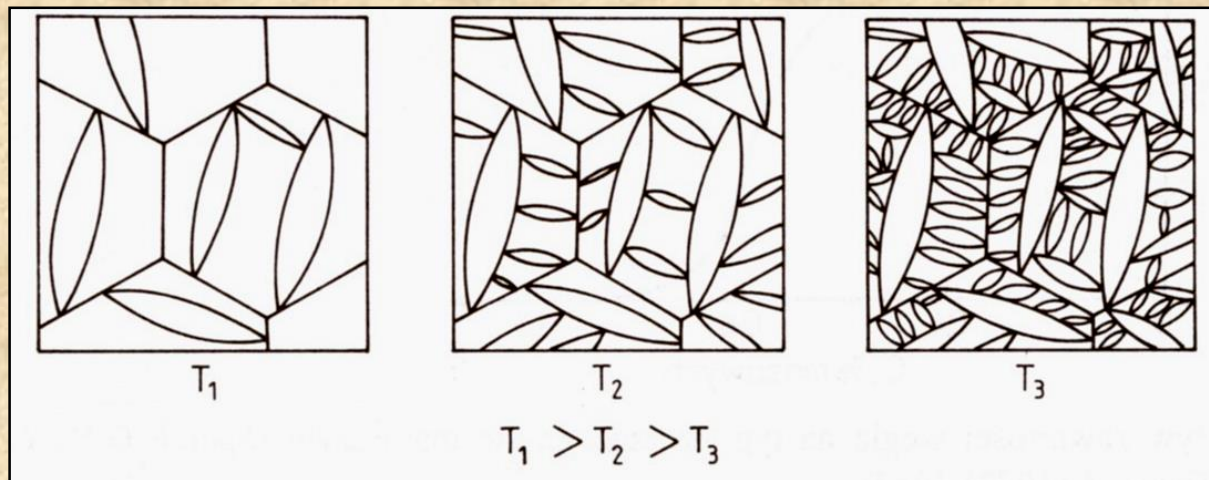


Struktura martenzytu płytkowego całkowicie zbliźniaczonego pow. 20 000x TEM



- **Soczewki martenzytu (RPC) zarodkują na granicach ziaren austenitu (RSC) i natychmiast się rozrastają.**
- **Wzrost płytki kończy się na wadach struktury austenitu (RSC) lub na sąsiednich, wcześniej utworzonych płytkach martenzytu (RPC).**
- **Gdy napotykają następną granicę ziarna, ich wzrost zostaje zatrzymany.**

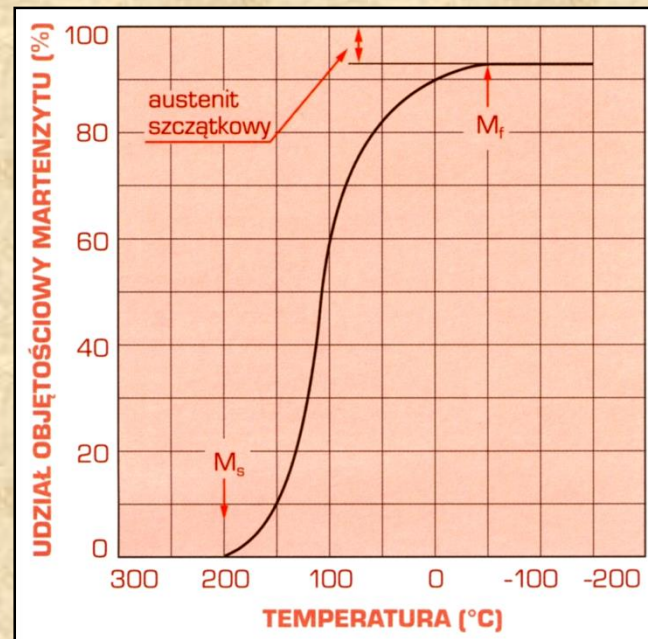




- W miarę obniżania temperatury przemiana martenzytyczna zachodzi dzięki tworzeniu się nowych płytek.
- Na samym początku przemiany powstają największe płytki, których wielkość jest ograniczona wielkością ziarna austenitu
- Wzrost płytek martenzytu zachodzi dzięki migracji koherentnych granic międzyfazowych (martenzyt-austenit), a takie granice dla danej płytki mogą istnieć tylko w obrębie jednego ziarna Fe_γ
- **Duże płytki martenzytu – źle!!!**
- **Małe płytki martenzytu – dobrze !!! (właściwości izotropowe i małe naprężenia własne)**
- **Przed przemianą martenzytyczną należy unikać rozrostu ziaren Fe_γ**

Austenit szczątkowy

- **Objętość właściwa martenzytu jest o około 3% większa od objętości właściwej austenitu.**
- W wyniku tego w nieprzemienionym austenicie powstają silne naprężenia ściskające, hamujące lub całkowicie blokujące dalszą przemianę.
- **Przemiana nie przebiega w całej objętości austenitu** i dlatego po jej zakończeniu pozostaje zawsze pewna ilość austenitu zwanego **austenitem szczątkowym**



Krzywa kinetyczna przemiany martenzytycznej w stali 1.0%C i 1.5%Cr

Zależność udziału martenzytu od temperatury przechłodzenia

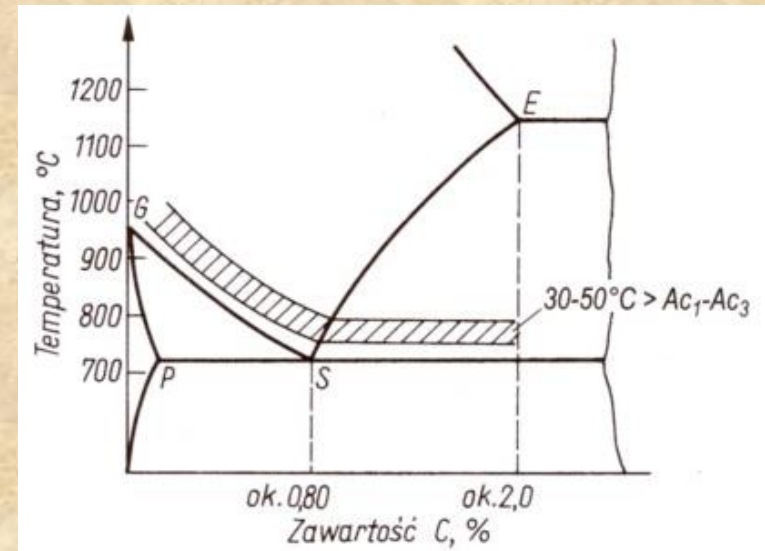
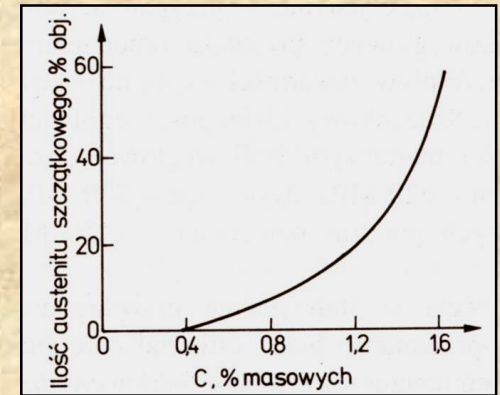
Początkowo po przekroczeniu M_s postęp przemiany jest niewielki, ale nasila się w miarę obniżania temperatury. Maksimum szybkości przemiany zostaje osiągnięte po przemianie ok. 50% austenitu, po czym znowu maleje osiągając 0 w temp. M_f pomimo, że pozostaje jeszcze pewna ilość nieprzemienionego austenitu.

Od czego zależy ilość austenitu szczątkowego?

wzrasta wraz ze stężeniem C w stali!

Ilość austenitu szczątkowego zwiększają dodatki stopowe: Mn, Cr i Ni, natomiast Co obniża jego ilość.

Temperatura austenitzowania (grzanie mające na celu otrzymanie struktury austenicznej 30-50°C powyżej linii GSK – A3 dla stali podutektoidalnej i A1 dla stali nadeutektoidalnej), gdyż od niej zależy nasycenie austenitu węglem i pierwiastkami stopowymi. Dlatego też ze wzrostem temperatury austenitzowania ilość austenitu szczątkowego zwiększa się.

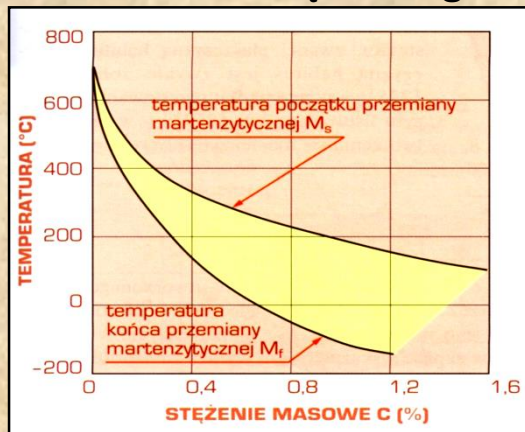


Austenit szczątkkowy

Obróbkę cieplną służącą do uzyskania struktury martenzytycznej nazywa się hartowaniem.

Oziębianie podczas hartowania jest realizowane w temperaturze otoczenia.

Ponieważ temp. M_f w stalach o wyższej zawartości węgla jest niższa od temperatury otoczenia, po hartowaniu takich stali zawsze pozostaje pewna ilość austenitu szczątkowego.

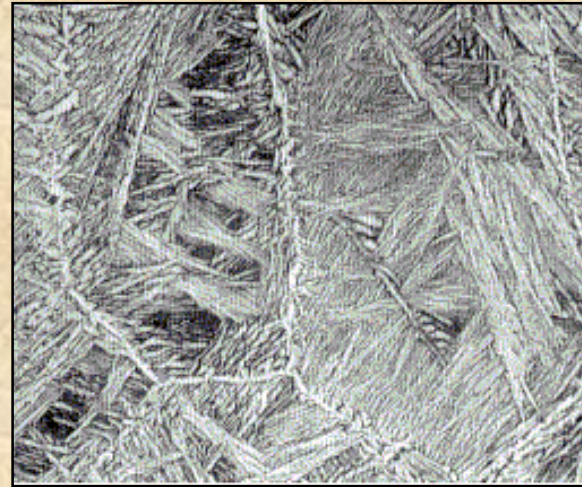


**Ciemne listwy – martenzyt,
jasne obszary austenit
szczątkowy**

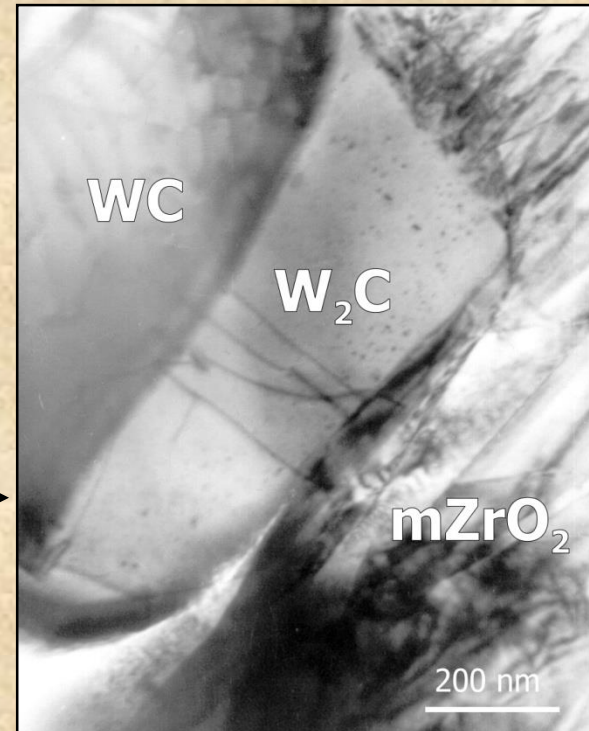


- 1. Austenit szczałkowy obniża twardość zahartowanej stali, gdyż w przeciwieństwie do martenzytu jest miękki.**
- 2. Zwiększa odporność stali na ścieranie i powierzchniową wytrzymałość zmęczeniową, zmniejsza skłonność stali do kruchego pękania.**
- 3. Wada: skłonność do pękania przy szlifowaniu, niestabilność wymiarowa i obniżenie odporności korozyjnej.**

- **Przemiana martenzytyczna nie ogranicza się do stali!!!!**
- Występuje również w niektórych czystych metalach z odmianami alotropowymi (wysokotemperaturowa odmiana alotropowa $Ti\beta$ krystalizująca w układzie regularnym ulega w temp. 882.5°C przemianie w $Ti\alpha$ krystalizującej w układzie heksagonalnym), w stopach metali (Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Al), materiałach ceramicznych (przemiana martenzytyczna $t\text{-ZrO}_2$ w $m\text{-ZrO}_2$) oraz polimerach.

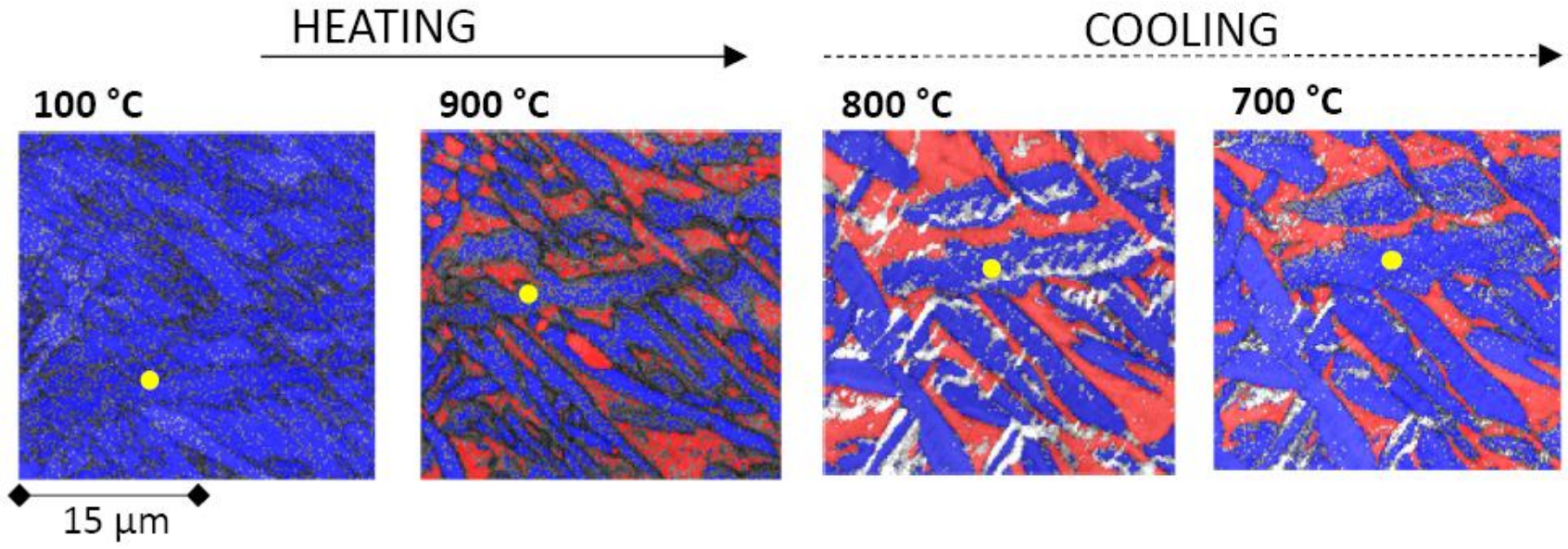
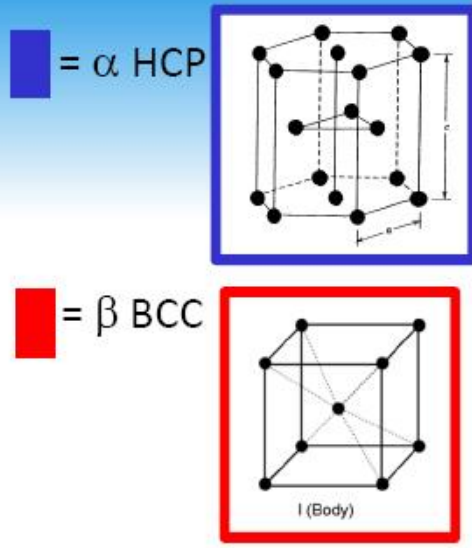


Martenzyt w Ti



In-situ phase transformation $\alpha \rightarrow \beta$ in Titanium

- ❖ Specimen: 5 mm x 5 mm x 1 mm pure electropolished Ti.
- ❖ At 100 °C Ti exists in the HCP phase .
- ❖ Close to 880°C, Ti undergoes an allotropic transformation to BCC.
- ❖ Upon cooling, Ti structure gradually reverts back to HCP (equiaxed / Widmanstatten structure).
- ❖ Yellow marker shows minimal drift at elevated temperatures

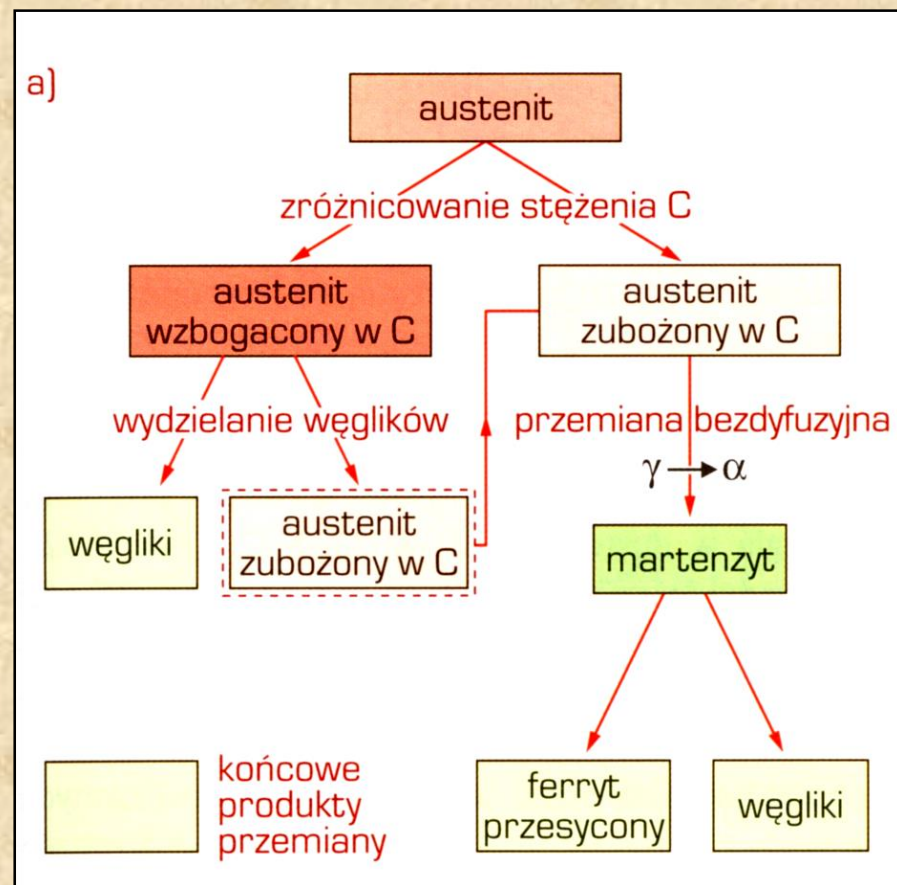


1. Najczęściej i najdokładniej badano przemianę martenzytyczną w stalach, ponieważ produkt przemiany charakteryzuje się bardzo dużą twardością (przeszło 4-krotny wzrost twardości w stosunku do zwykłej stali węglowej) i zmniejszeniem plastyczności (praktyczne do zera).
2. Gdy nowa faza w jakimś materiale powstaje w wyniku przemiany bezdyfuzyjnej, zawsze jest uważana za **martenzyt!!!**
3. **Przemiany bezdyfuzyjne są zawsze nazywane przemianami martenzytycznymi.**

Różnice i podobieństwa pomiędzy bainitem i martenzytem

- **Martenzyt jest fazą, bainit – mieszaniną faz**
- **Bainit dolny jest morfologicznie podobny do martenzytu**
- **Przemiana bainityczna jest przemianą dyfuzyjną i zachodzi powyżej temp. M_s**
- **Przemiana martenzytyczna jest przemianą bezdyfuzyjną i zachodzi poniżej temp M_s**
- **Twardość bainitu dolnego jest zbliżona do twardości martenzytu**
- **Obie przemiany zachodzą w zakresie temperatur pomiędzy temperaturą początku i końca przemiany**
- **W obydwu przemianach odgrywa rolę mechanizm ścinania (w przemianie martenzytycznej jest to mechanizm dominujący).**

- W obszarach Fe_γ 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_γ ulegające następnie bezdyfuzyjnej przemianie martenzytycznej
- **Rozrost bainitu jest kontrolowany szybkością dyfuzji C w Fe_γ , a nie szybkością przemiany martenzytycznej**



Charakterystyka przemian dyfuzyjnych

Podsumowanie

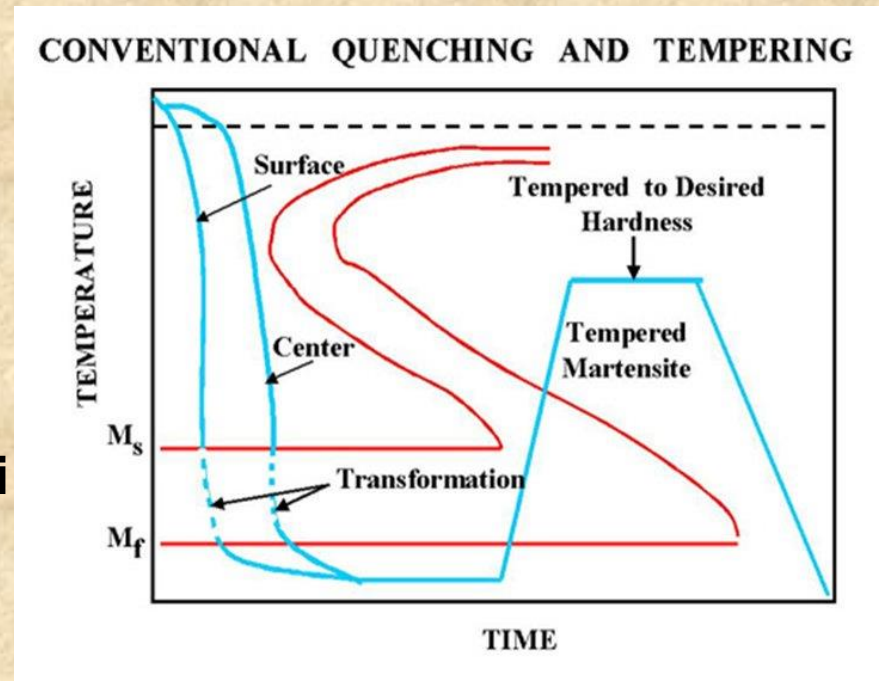
- Atomy przemieszczają się na odległość rzędu od 1 do 10^6 odległości międzyatomowych;
- Atomy przemieszczają się z miejsca na miejsce w wyniku dyfuzji aktywowanej cieplnie;
- Atomy „przeskakują” przypadkowo z miejsca na miejsce jednak więcej przeskakuje „do przodu” niż do „tyłu”;
- Szybkość przemiany 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

- 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.

Odpuszczanie (tempering)

- Jest to nagrzewanie zahartowanej stali (o strukturze martenzytycznej) celem zwiększenia jej plastyczności
- Odpuszczanie uprzednio zahartowanej stali polega na jej nagraniu do temperatury nieprzekraczającej A_{c1} , wygrzaniu w czasie od 30 minut do kilku godzin i oziębianiu. Operacja ta jest stosowana w celu zmiany struktury i właściwości materiału w kierunku 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.

- W zakresie 80 - 250°C wydziela się nadmiar węgla w postaci węglika ϵ o składzie zmiennym od Fe_2C do $Fe_{2,3}C$. Rezultatem jest stopniowy zanik tetragonalności sieci martenzytu oraz związanych z tym naprężeń. Od około 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**.

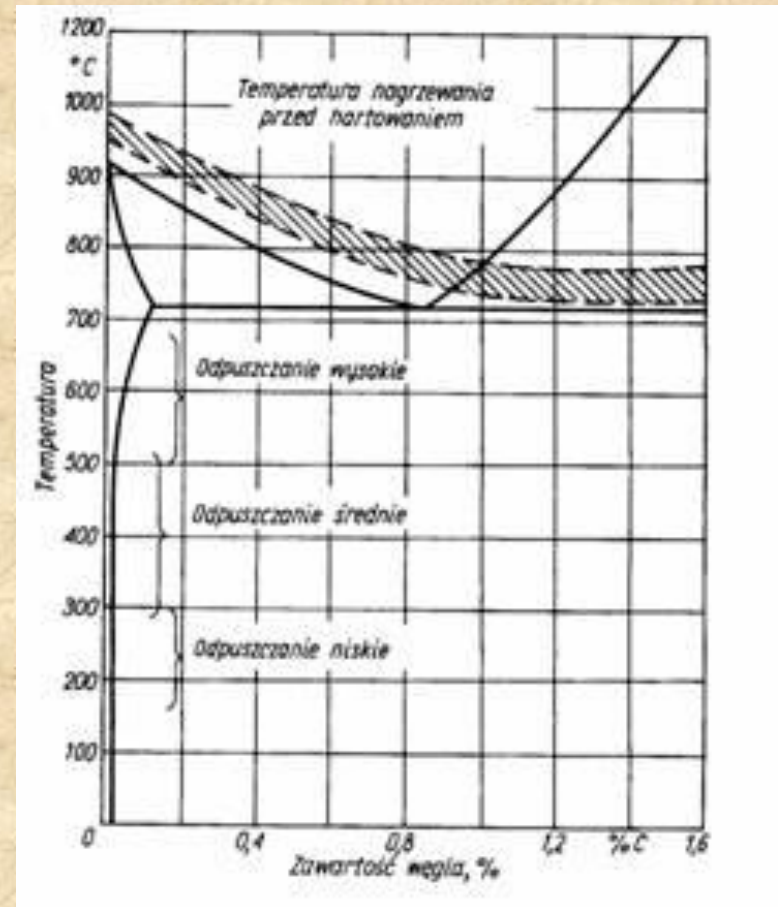
Jednocześnie na skutek zaniku tetragonalności martenzytu i zmniejszenia naprężeń ściskających, austenit szczątkowy (jeżeli jest) ulega przemianie w martenzyt odpuszczony.

- 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 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 temperatury $250 - 500^{\circ}\text{C}$; po odpuszczeniu w temperaturze powyżej $400 - 500^{\circ}\text{C}$ uzyskuje się wysoką granicę sprężystości przy dostatecznej plastyczności (sprężyny, resory);

- **odpuszczanie wysokie** - pomiędzy temperaturą 500°C i A_c1 w czasie 2 - 3 h przy chłodzeniu powolnym lub przyspieszonym; stosowane do stali konstrukcyjnych w celu uzyskania optymalnego kompleksu właściwości mechanicznych, tj. dużych wartości R_m i R_e 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.

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

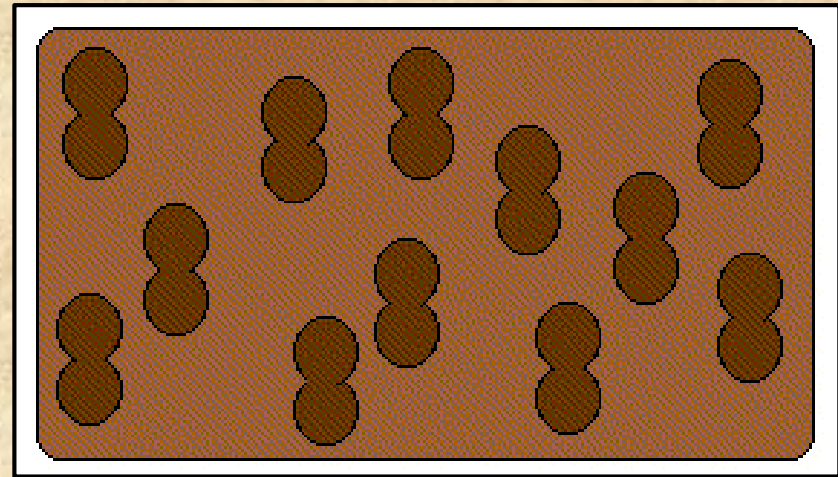
Warunki jakie powinny spełniać osnowa i wydzielenia umacniające:

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

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)

- 1. Występująca w stopie faza ciągła stanowiąca znaczną jego objętość – osnowa**
- 2. Tworzące się w osnowie cząstki innej fazy – 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**

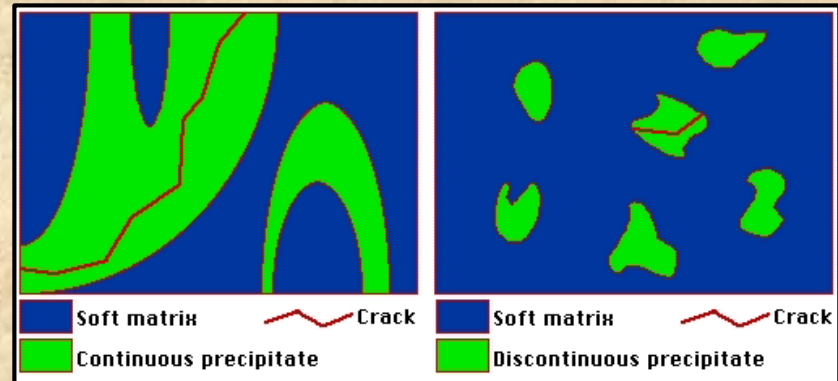
There are a few basic guidelines materials engineers use in order to predict the behaviour of the relationship between the matrix and precipitate



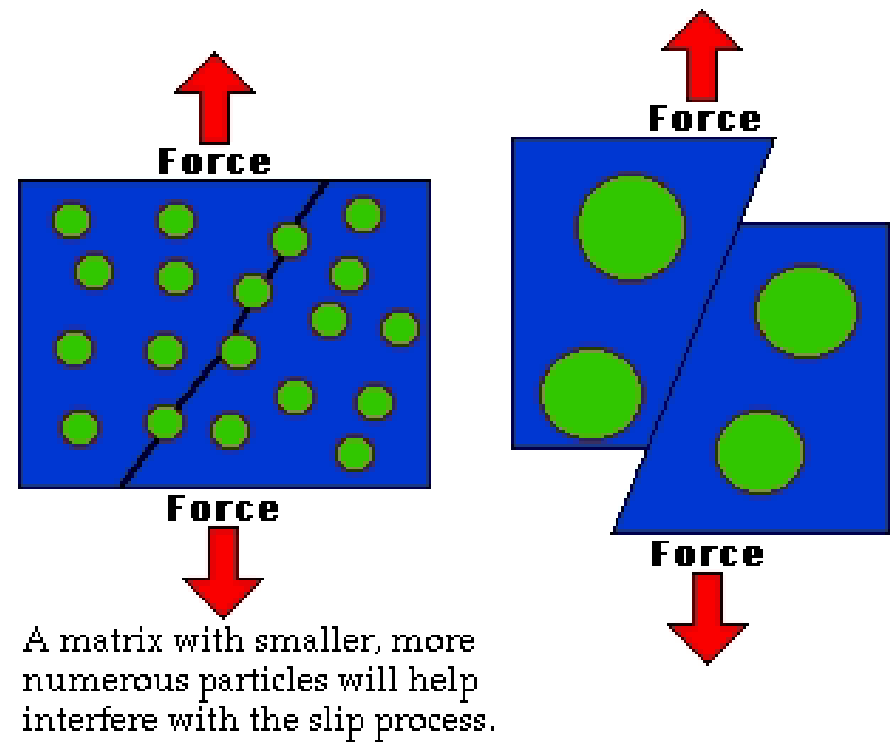
A good alloy should have a soft ductile matrix with hard precipitates

- 1. The matrix should be soft in order to provide some ductility to the alloy. The precipitate should be hard in order to give strength to the alloy. By increasing the amount of precipitates, we can increase the strength.***

- 2. The precipitate should be discontinuous or cracks could propagate through the entire structure. A crack in a discontinuous precipitate will be stopped by the matrix.***

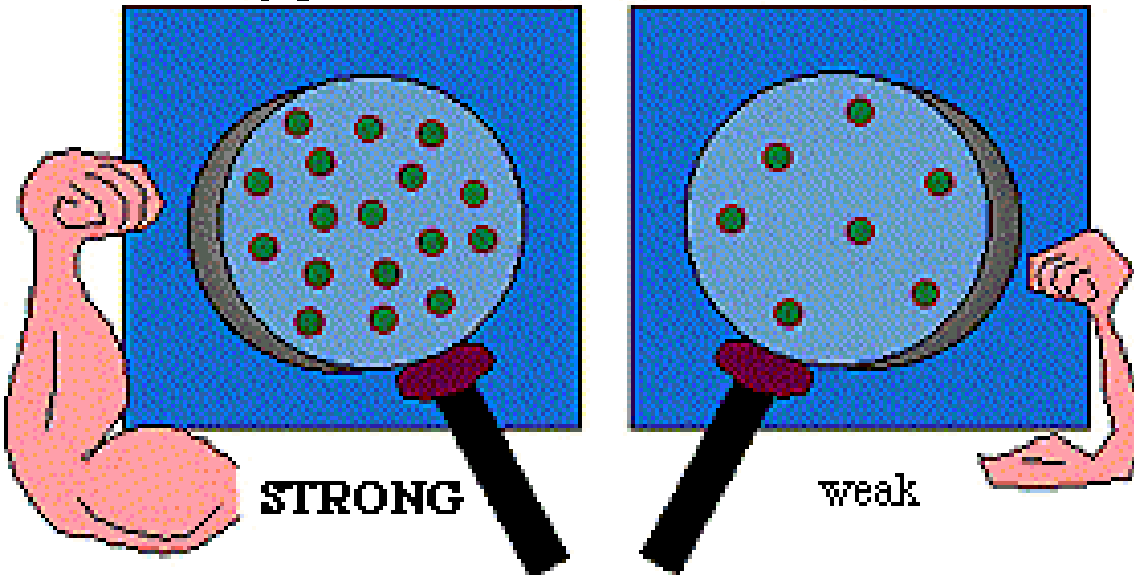


3. *Smaller, more numerous precipitate particles are preferred because they increase the chances of interfering with slip.*

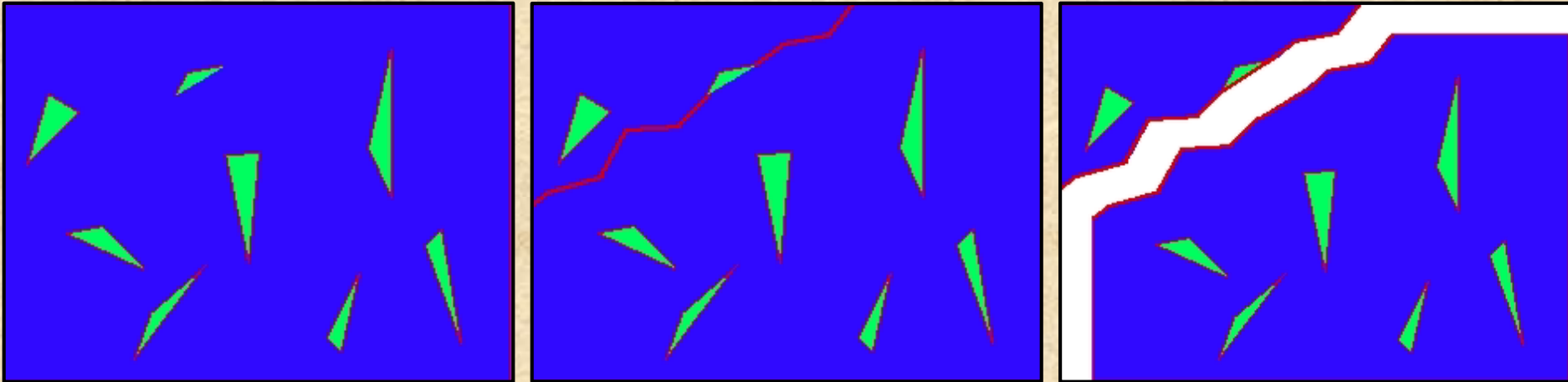


Many particulates

Few Particulates

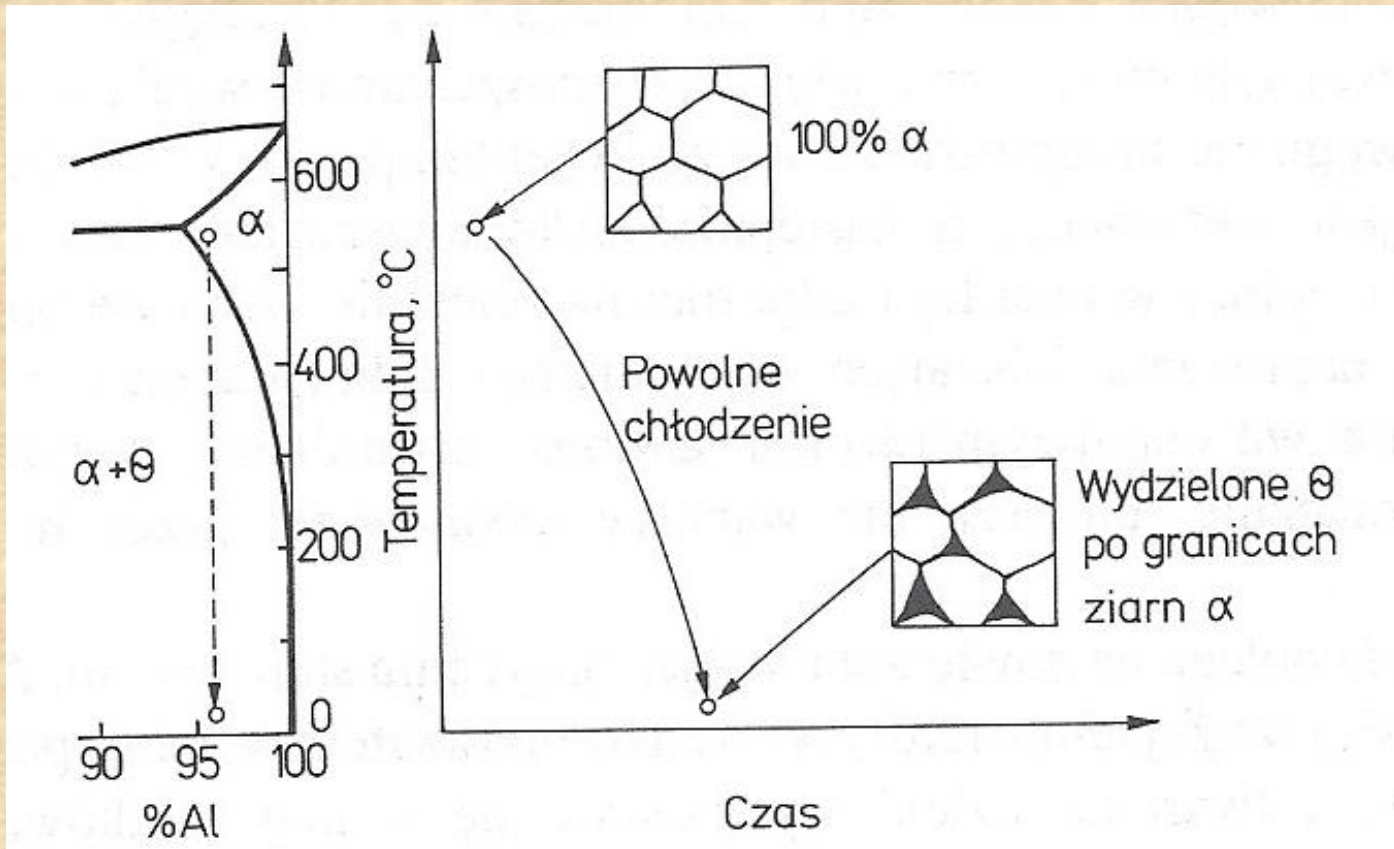


4. Round particles are better than needle-like ones; needle-like particles are more likely to initiate a crack.



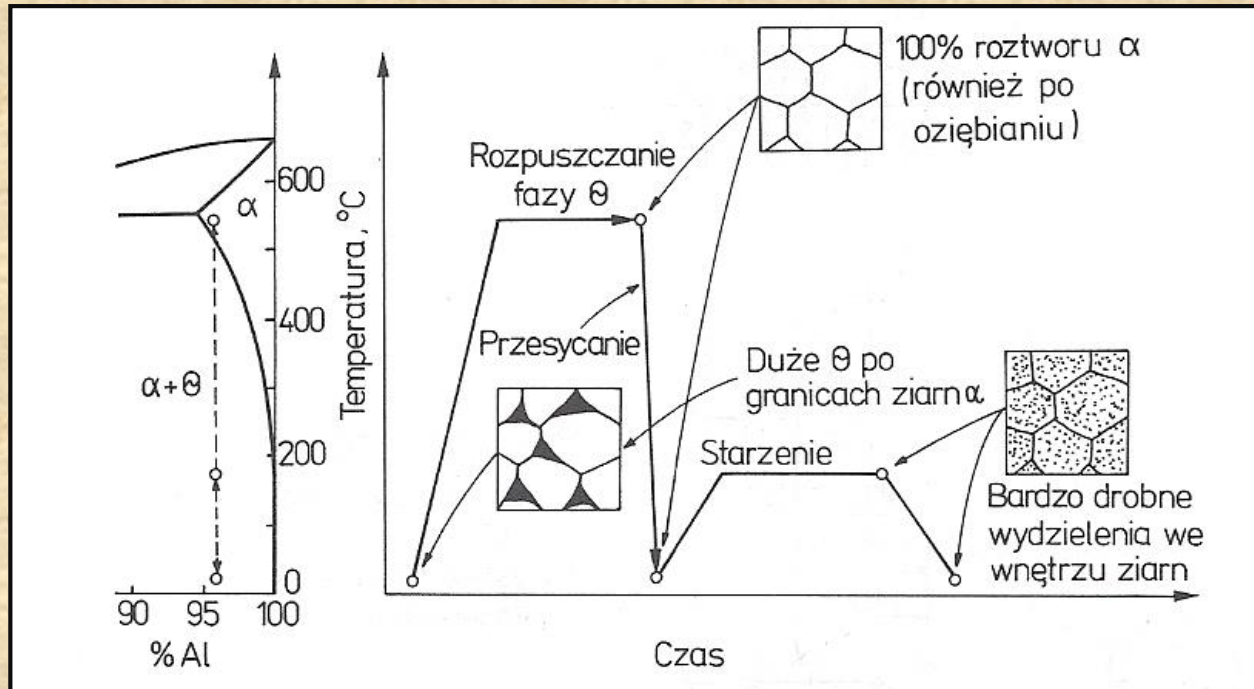
Round particles are less likely to initiate a crack and cause a catastrophe

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Powolne chłodzenie stopu AlCu4 z zakresu jednofazowego do temperatury otoczenia powoduje tworzenie się dużych wydzielań fazy θ (CuAl_2) na granicach fazy α

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Schemat obróbki cieplnej prowadzącej do umocnienia wydzieleniowego stopu $AlCu_4$

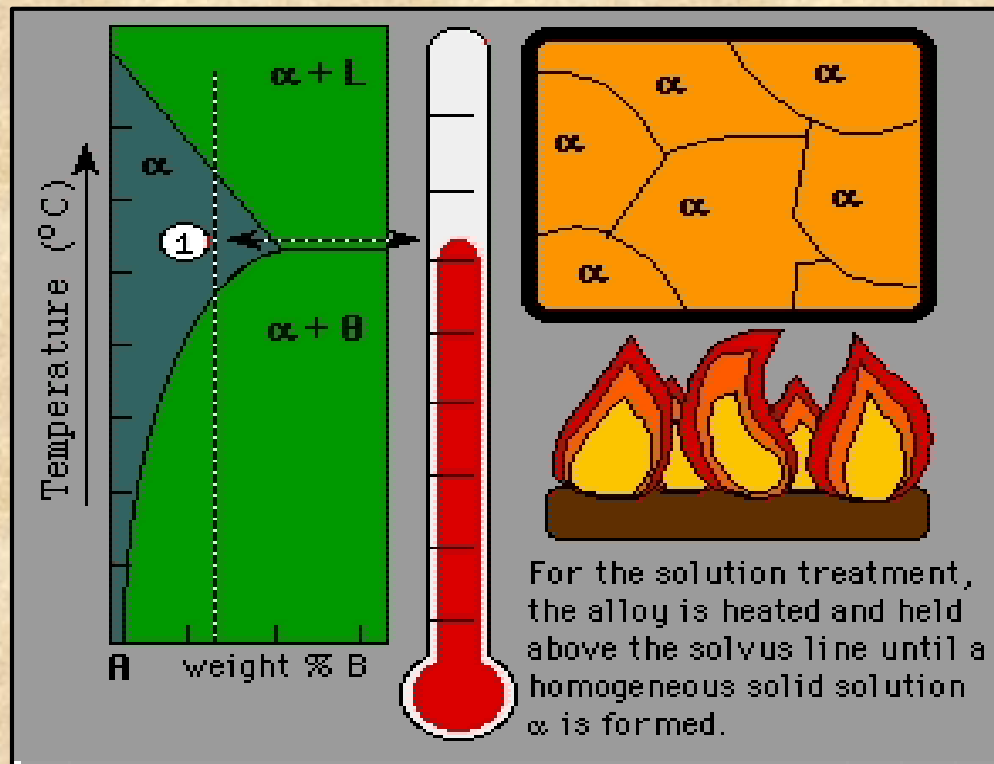
- 1) **Rozpuszczanie** – stop nagrzewany jest to zakresu roztworu α i wytrzymywany w celu rozpuszczania cząstek θ
- 2) **Oziębienie (przesycanie)** – stop jest oziębiany z szybkością zapewniającą zatrzymanie atomów Cu w roztworze (przesycanie)
- 3) **Starzenie** – wytrzymywanie stopu w temperaturze otoczenia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

Age or Precipitation Hardening

- *Precipitation hardening produces a fine, hard, uniformly dispersed, coherent precipitate in a soft, ductile matrix.*
- *There are three main steps to this age-hardening heat treatment.*
- *The term **age hardening** is sometimes reserved for the case where step 3 occurs at room temperature.*

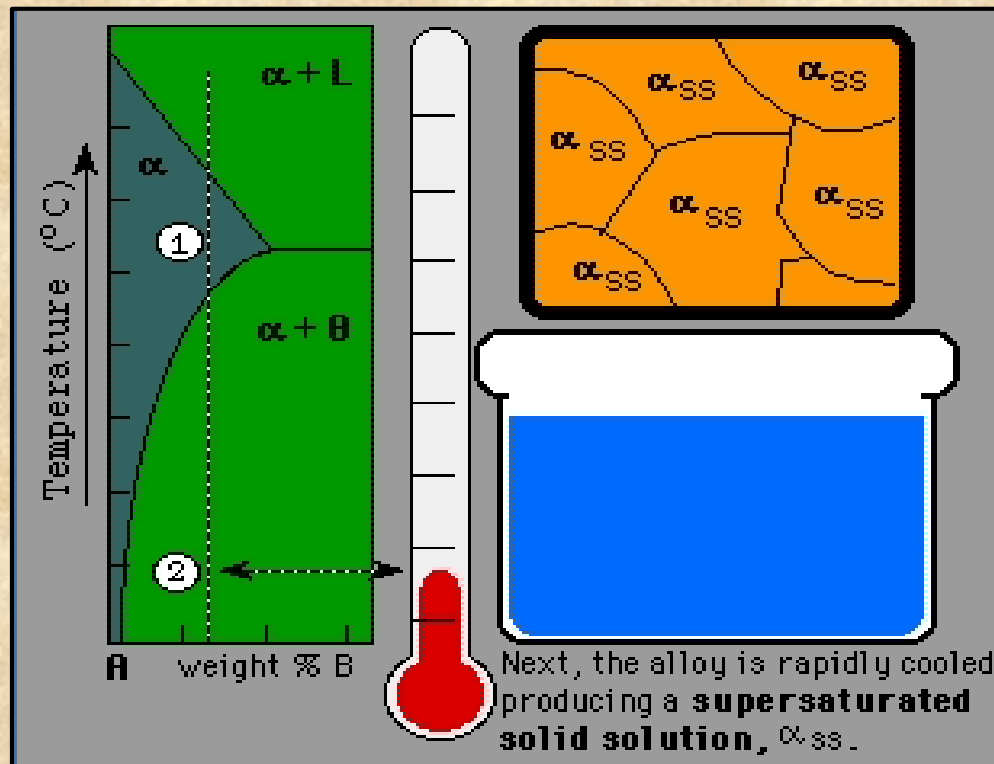
Step 1: Solution Treatment

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



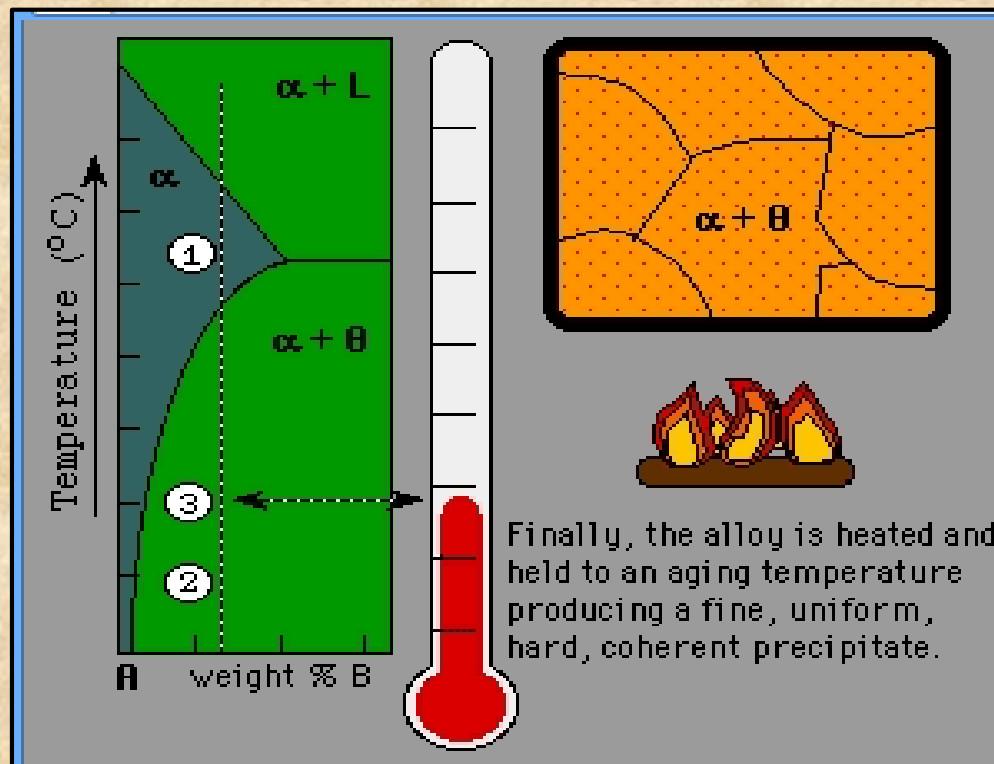
Step 2: Quench

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!



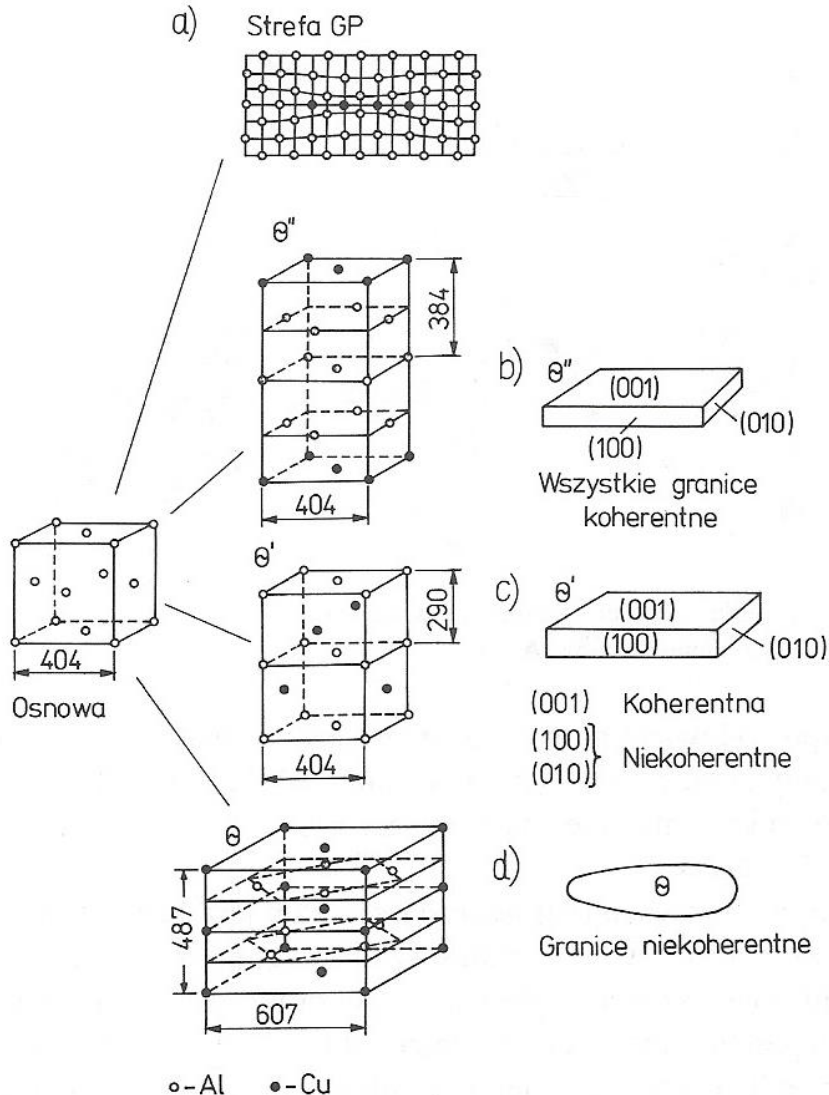
Step 3: Aging

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

Tworzące się fazy metastabilne i faza stabilna podczas starzenia stopu $AlCu_4$



a) Strefy Guinier-Prestona (GP)

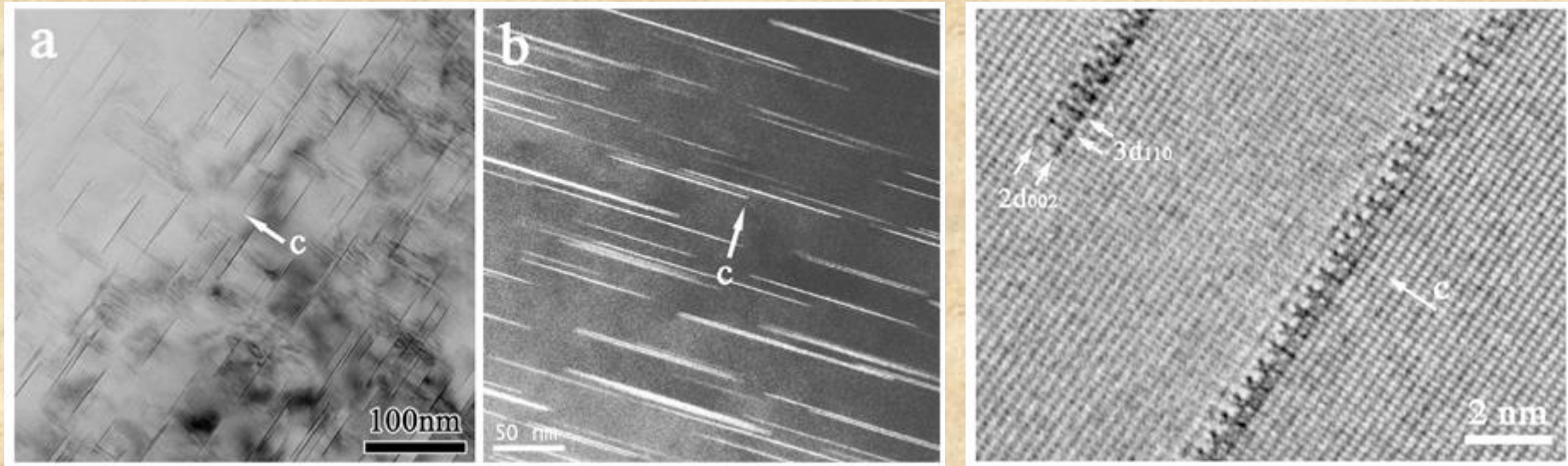
zarodkują jednorodnie w przesyconej osnowie, mają kształt dysku i są w pełni koherentne z osnową; zachowaniu koherencji w obszarach krawędzi towarzyszą duże odkształcenia sprężyste;

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;

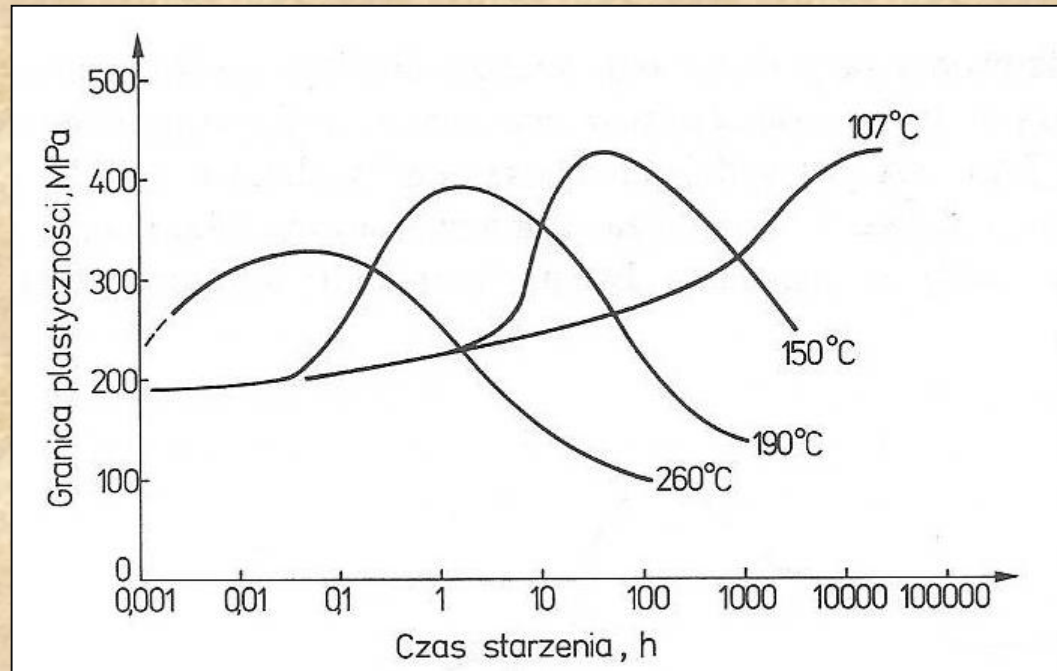
d) **Wydzielenia θ** są niekoherentne z osnową, zarodkują na granicach ziaren i na granicach międzyfazowych osnowa/wydzielenie θ'' (wymiarów w ppm)

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Strefy Guinier-Prestona w stopie Mg-Gd-Zn

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.

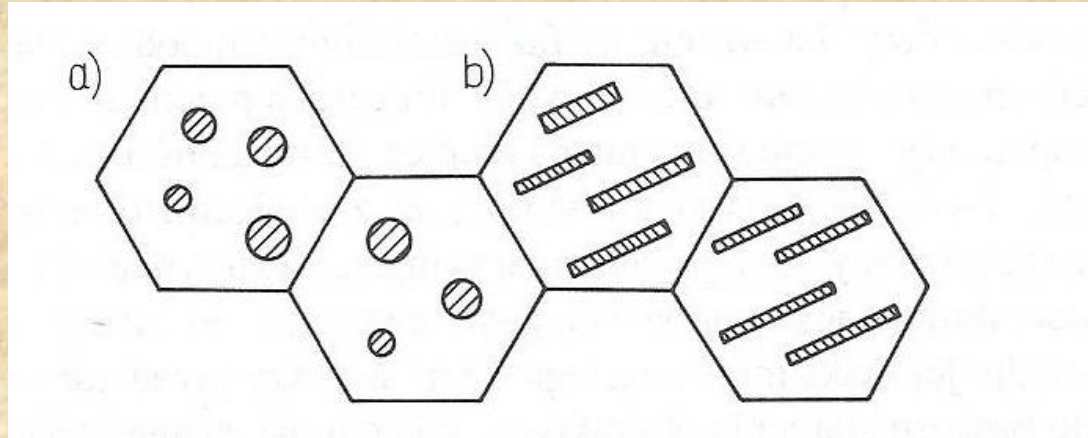
Starzenie w niskich temperaturach jest korzystne, gdyż uzyskuje się wtedy większą wytrzymałość. Uzyskane właściwości są bardziej jednorodne.

Umocnienie wydzieleniowe (wpływ orientacji)

Zasady dotyczące wydzielenia 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).*

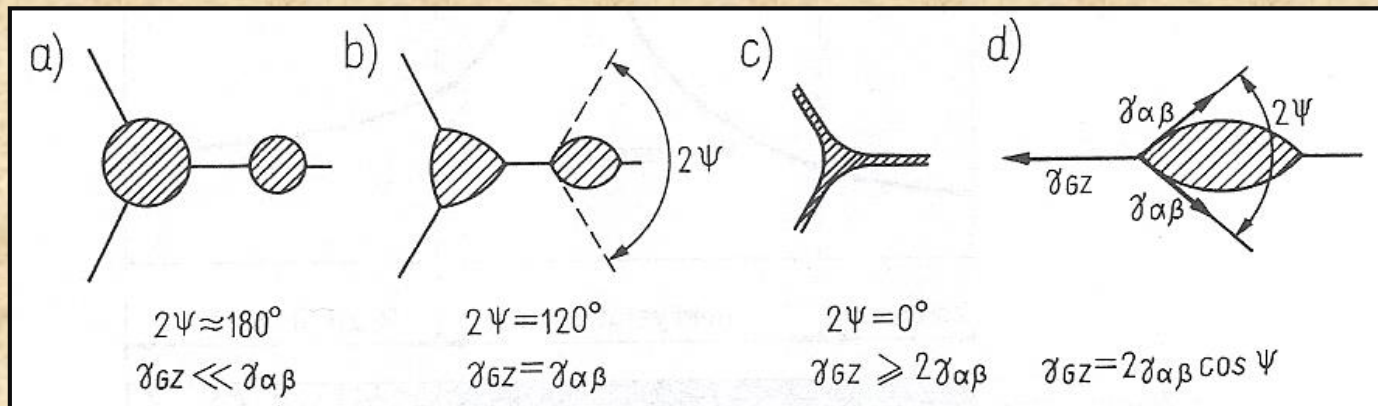
Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



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 wydzieleni są kuliste***
- 2. Jeżeli granica niskoenergetyczna istnieje tylko w jednej orientacji granicy międzyfazowej, to **cząstki wydzieleni mają kształt płytek***

Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie)



Równowagowe kształty cząstek drugiej fazy na granicy ziaren i powierzchni granic zależne od wartości kąta 2ψ .

Linie styku granic ziaren i powierzchni granic ziaren są prostopadłe do ekranu. Kąt 2ψ jest jednoznacznie określony przez stosunek $\gamma_{GZ} / \gamma_{\alpha\beta}$, zatem jest taki sam dla cząstek wydzielonych na granicy ziaren i na styku trzech ziaren

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.

Dziękuję za uwagę