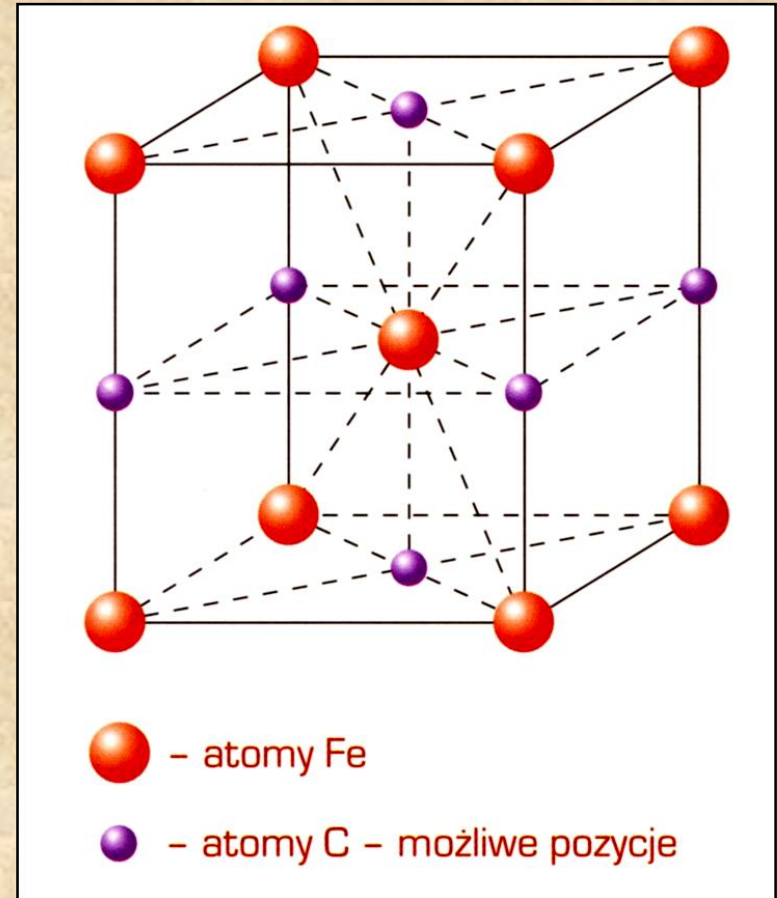


Przemiana martenzytyczna

- 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**



**Czas w przebiegu przemiany
martenzytycznej nie ogrywa żadnej roli!!!**

Warunkiem zajścia jest ochłodzenie austenitu:

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

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!!!

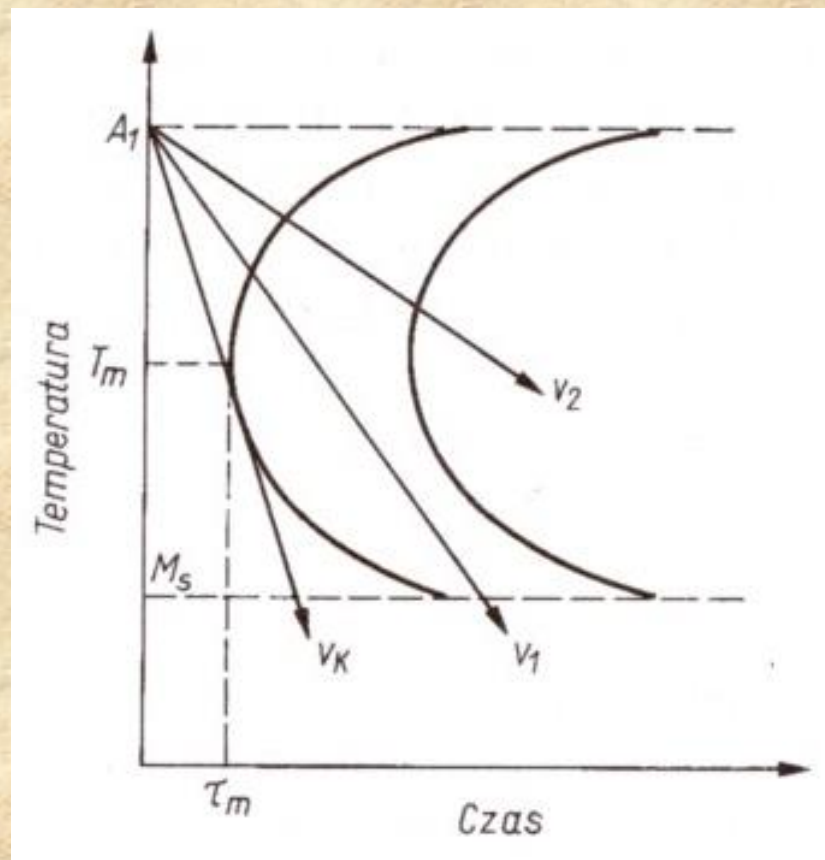
Kończy się w temperaturze końca przemiany M_f

Krytyczna szybkość chłodzenia

Wyraża ją styczna do krzywej początku przemiany.

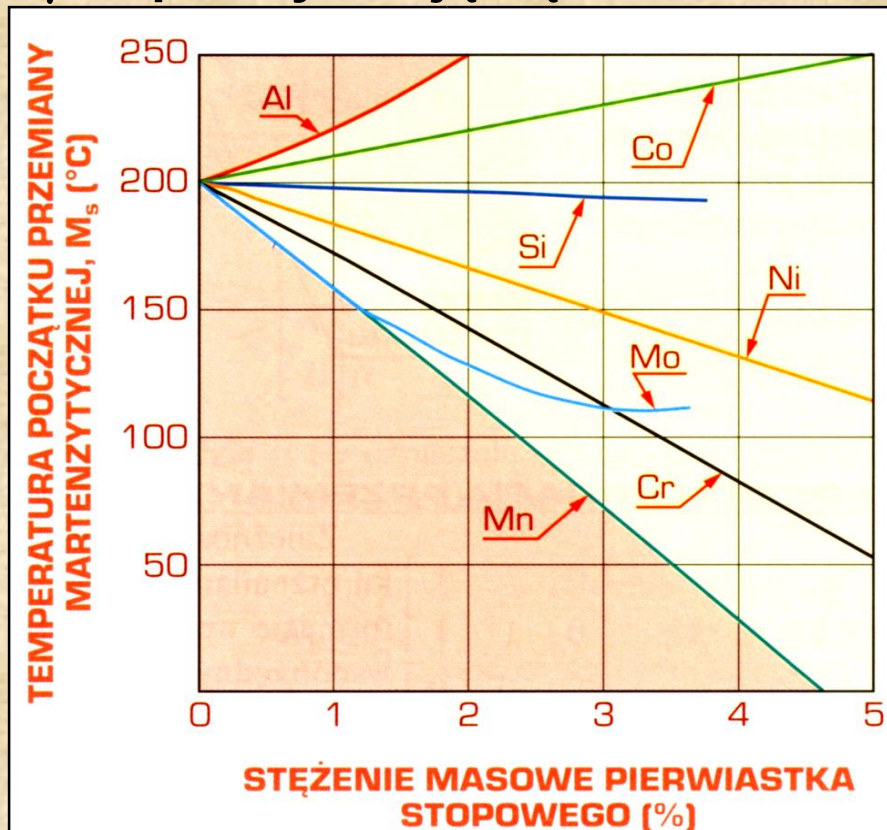
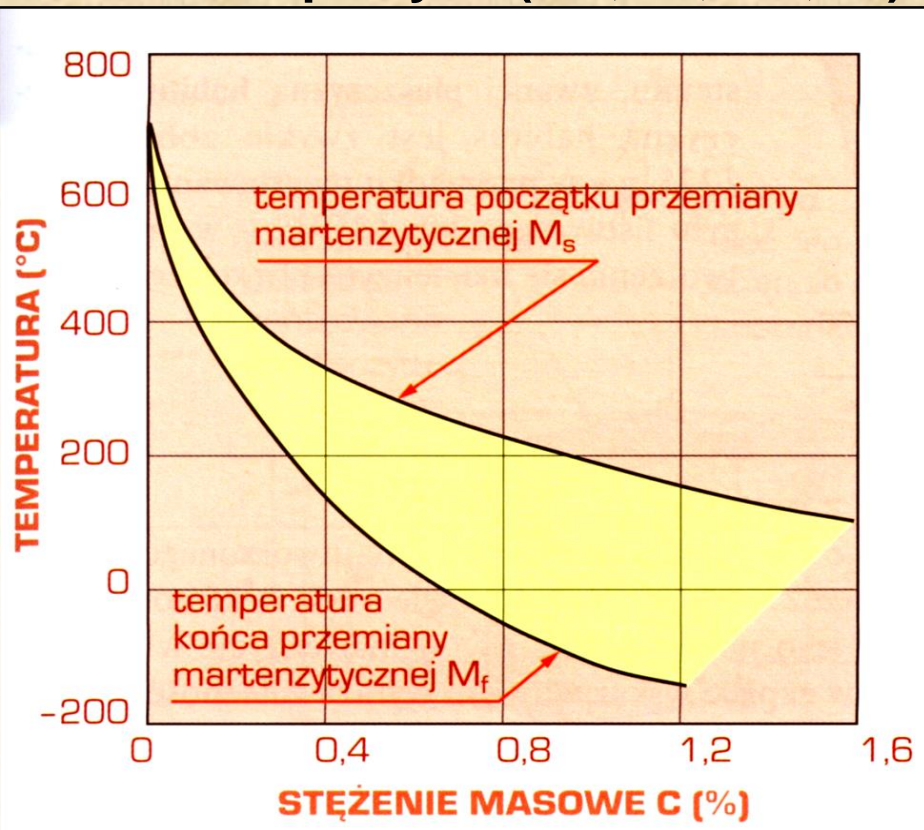
Krytyczną szybkość przemiany
to:

„szybkość zabezpieczająca przed wystąpieniem przemian dyfuzyjnych, które zachodzą w wyższych temperaturach niż przemiana martenzytyczna i rozkładając austenit uniemożliwiają jego przemianę w martenzyt”

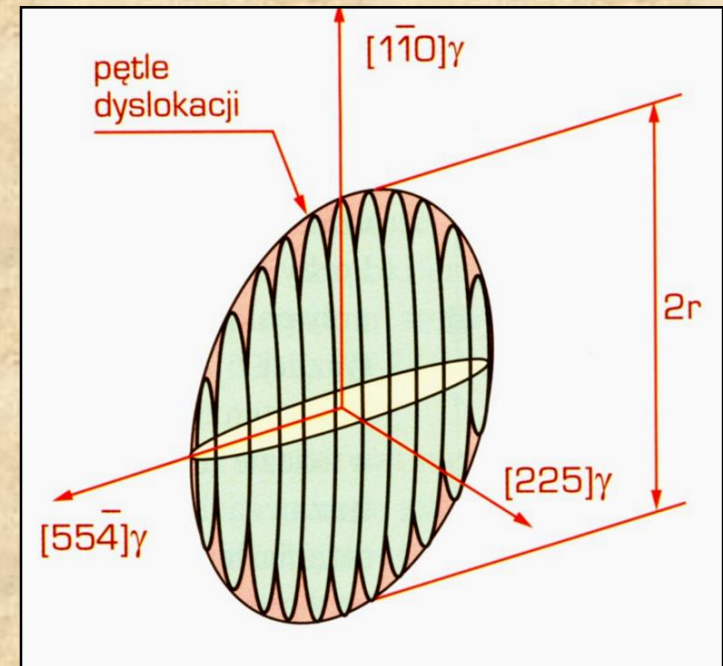


Krytyczna szybkość chłodzenia V_K określona za pomocą wykresu CTPi

- 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!!!
- Temp. M_s i M_f obniżają się ze zwiększeniem zawartości C w Fe_y
- Temp. M_s i M_f obniżają się ze zwiększeniem zawartości dodatków stopowych (Mn, Cr, Mo, Ni) w Fe_y, a podwyższają się dla Al i Co

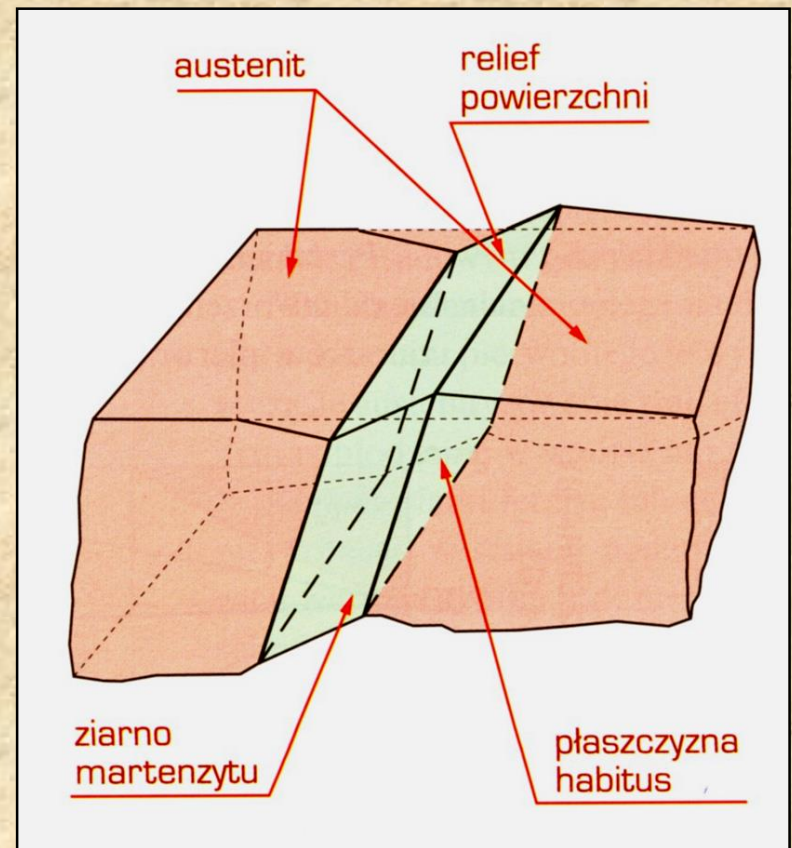


- Przemiana martenzytyczna rozpoczyna się od utworzenia w austenicie **embrionów**, tj. zarodków pierwotnych, którymi mogą być: błędy ułożenia, źródła Franka-Reada, defekty sieciowe (pętle dyslokacyjne) i równoległe ułożone dyslokacje
- Zarodkami przemiany martenzytycznej są embriony, które przekraczają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

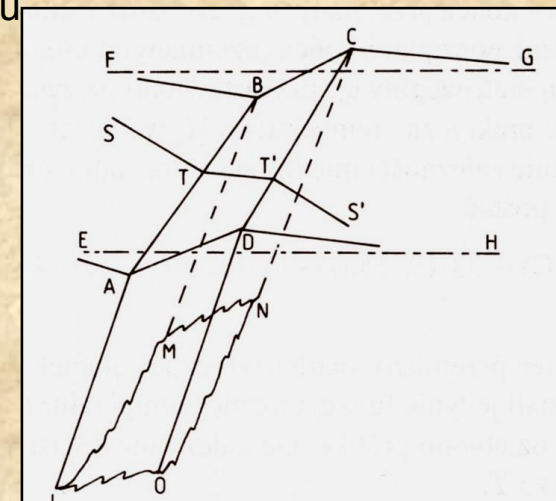


Model embrionu martenzytu utworzonego z pętli dyslokacji w austenicie (r – promień embrionu)

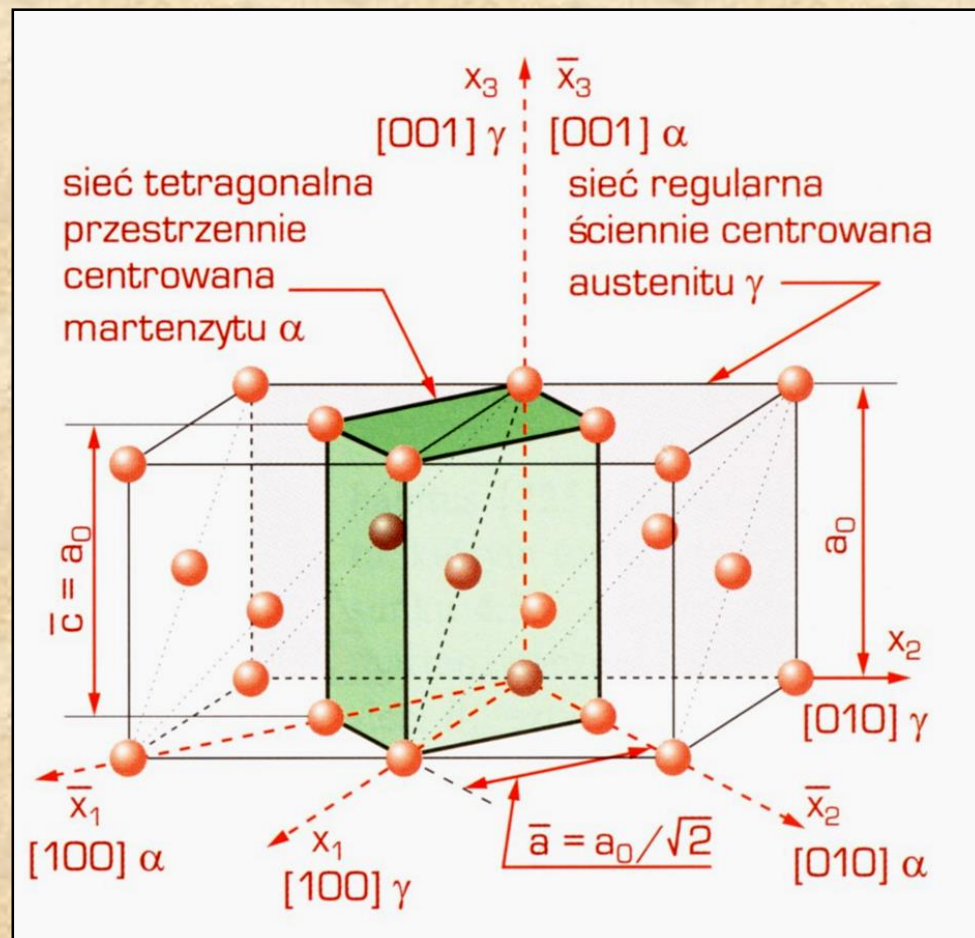
- Podczas przemiany martenzytycznej następuje **skoordynowane przemieszczanie atomów bez wymiany sąsiadujących atomów dziedzicznych z austenitu (nie ma dyfuzji!!!)**.
- Wszystkie atomy podlegają małym przemieszczeniom o **ułamek** odległości międzyatomowej względem atomów sąsiednich.
- W wyniku tego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

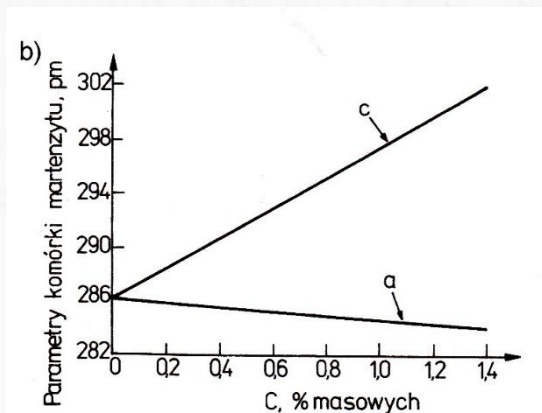
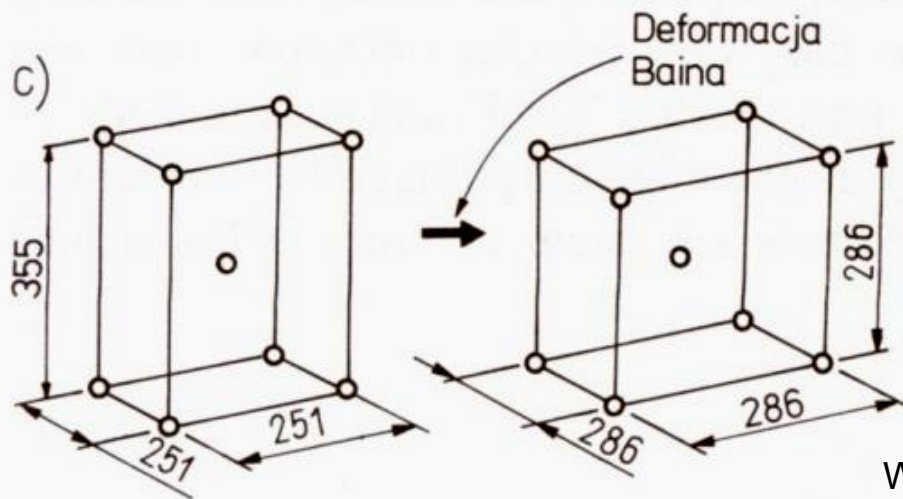
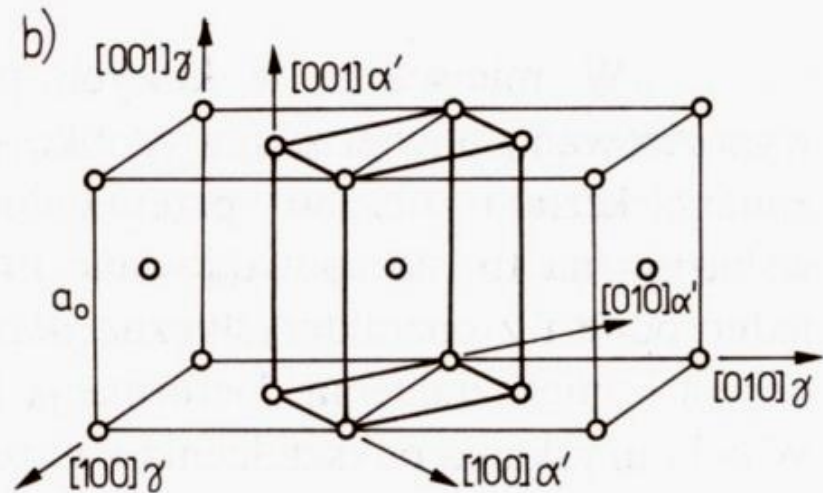
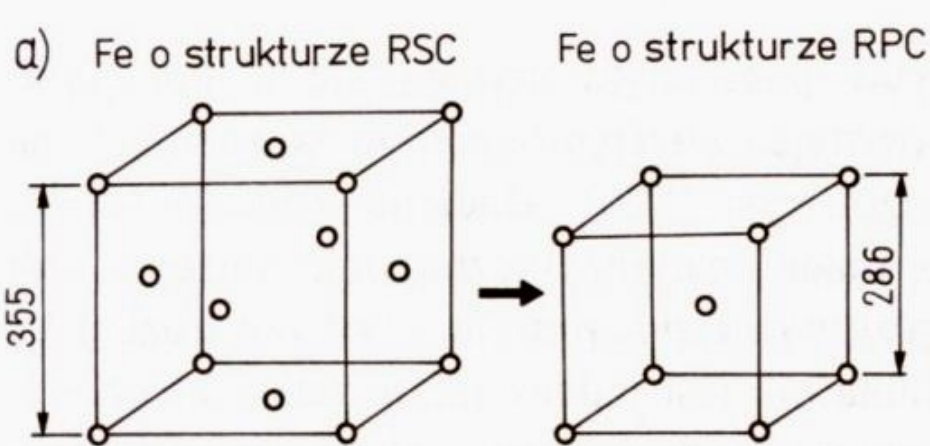


Zmiana kształtu
gładkiej
powierzchni
przez płytkę
martenzytu.
**Naniesiona
rysa STT'S'.**
Upřednio
polerowana
powierzchnia
FG i EH



W wyniku przemiany austenitu o sieci regularnie ściennie centrowanej (fcc) powstaje martenzyt o sieci tetragonalnej przestrzennie centrowanej





Wpływ zawartości C na parametry komórki martenzytu

Kolejne stadia przekształcania sieć A1 austenitu w sieć tetragonalną przestrzennie centrowaną martenzytu dla zawartości C = 0%, temp. pokojowa

Deformacja Baina komórki austenitu w komórkę martenzytu (wymiary w pm)

Podczas deformacji Baina następuje:

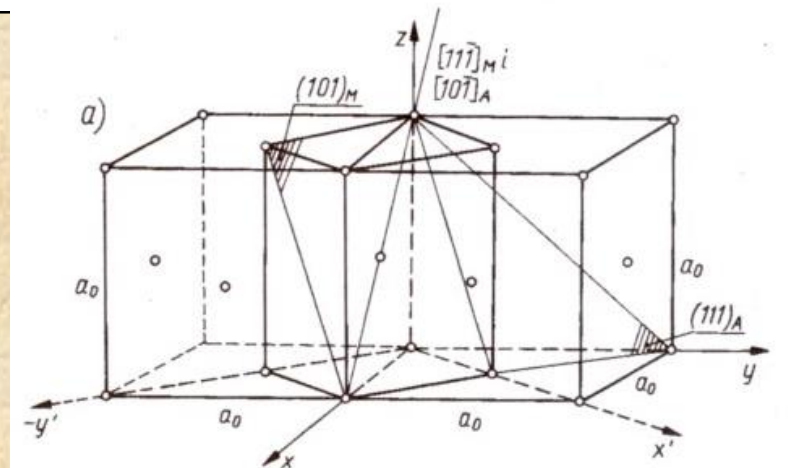
zmniejszenie komórki w kierunku [001] o 19.4%

wydłużenie w kierunkach [100] i [010] o 13,9%.

Pomiędzy martenzytem a austenitem istnieją ściśle określone zależności krystalograficzne

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	$\{111\}_\gamma \sim 1^\circ \text{ od } \{110\}_\alpha$	$\langle 110 \rangle_\gamma \sim 2^\circ \text{ od } \langle 111 \rangle_\alpha$

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.

W stalach zawierających do 0.5 %C tworzący się martenzyt ma względem austenitu zależność Kurdjumowa-Sachsa:

$$\{111\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha \quad \langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle_\gamma \parallel \langle 1\bar{1}1 \rangle_\alpha$$

natomiast płaszczyzną "habitus" jest płaszczyzna $\{111\}_\gamma$

Jeżeli stal zawiera więcej węgla, to zależnością między martenzytem i austenitem jest również zależność K-S, natomiast płaszczyzną "habitus" jest płaszczyzna $\{225\}_\gamma$

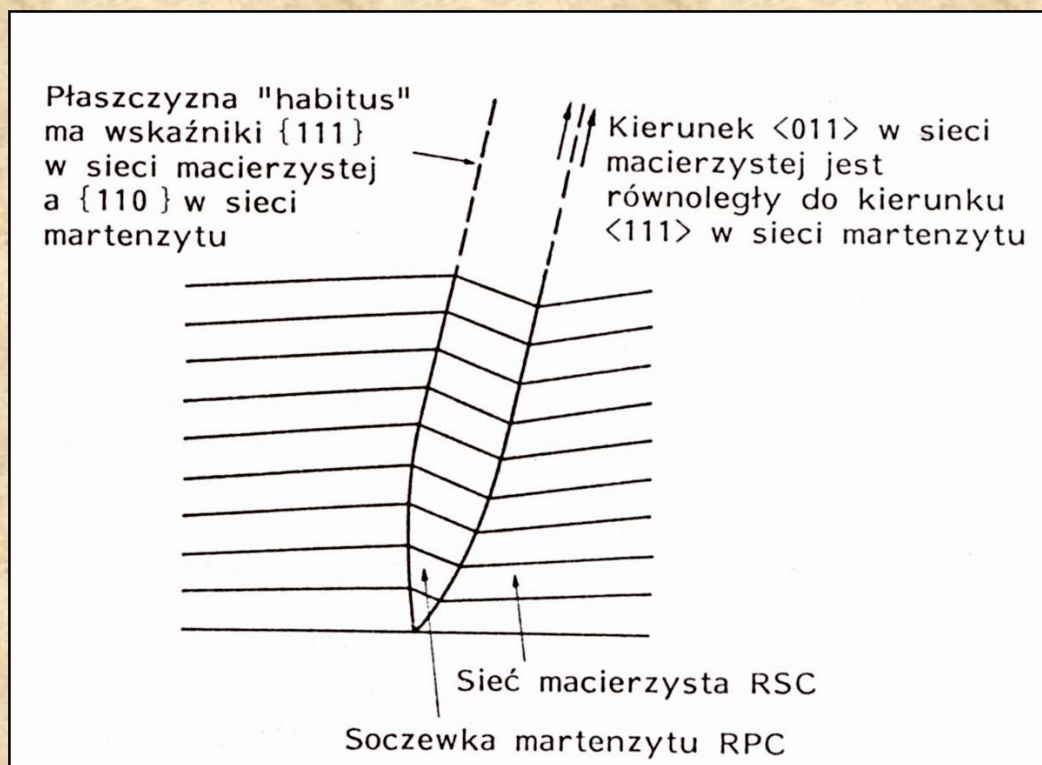
W przypadku stali zawierających powyżej 1.4%C między martenzytem i austenitem występuje zależność Nishiyamy-Wassermana, a płaszczyzną "habitus" jest płaszczyzna $\{259\}_\gamma$

$$\{111\}_\gamma \parallel \{110\}_\alpha \quad \langle 11\bar{2} \rangle_\gamma \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_\alpha$$

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

- Granice ziaren martenzytu są położone wzdłuż tej nieodkształconej i nieulegającej obrotowi płaszczyzny austenitu: **płaszczyzna „habitus”**
- Jest to płaszczyzna krystaliczna austenitu, do której jest równoległa płytka martenzytu.
- Płaszczyzna habitus jest zwykle zbliżona do $(225)_\gamma$ - w przypadku powstawania *martenzytu listwowego* lub $(259)_\gamma$ - w przypadku tworzenia się *martenzytu płytkowego*.

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



Zależności krystalograficzne dotyczą
CZYSTEGO Fe

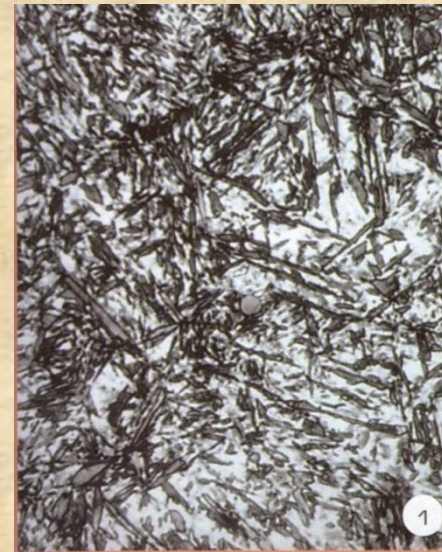
- W wyniku przemiany martenzytycznej w stalach mogą utworzyć się dwa rodzaje martenzytu:

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 **brak jest austenitu szczątkowego**

2. Płytkowy (zbliżniaczony, 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 μ m. Listwy tworzące się w kierunku $\langle 111 \rangle$ martenzytu układają się równoległe względem siebie tworząc tzw. **pakiety**.
- Sąsiadujące listwy oddzielone są LAGBs, natomiast pakiety oddzielone są HAGBs o orientacji bliźniaczej ($\langle 111 \rangle$ 60°).



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

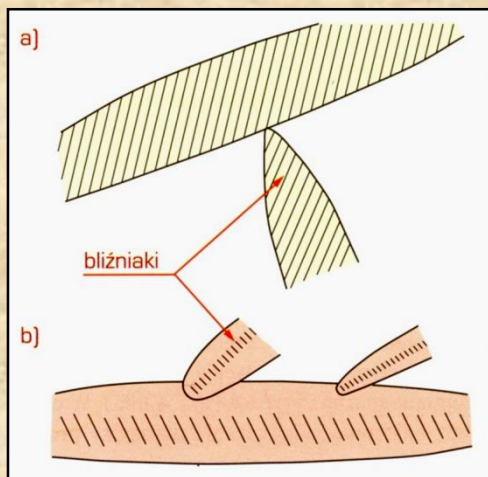


Struktura martenzytu listwowego z płytkowymi wydzieleniami Fe₃C wewnątrz listew, pow. 19 000 x, TEM

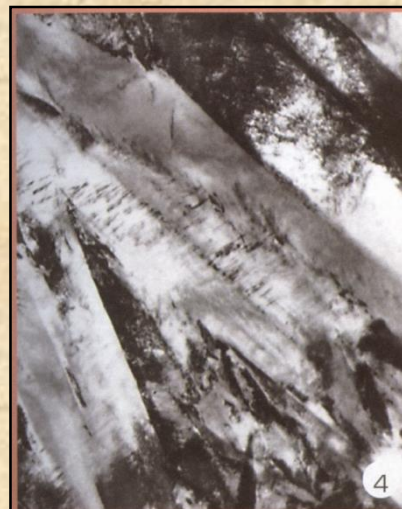
- **Martenzyt płytkowy (zbliżniaczony, iglasty)** powstaje w wysokowęglowych stopach Fe w ściśle określonych zakresach stężenia pierwiastków stopowych;
- Kryształy martenzytu mają kształtek płytek zbliżonych do soczewek o powierzchni w różnym stopniu nieregularnej w zależności od stopnia zbliźniaczenia. 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.



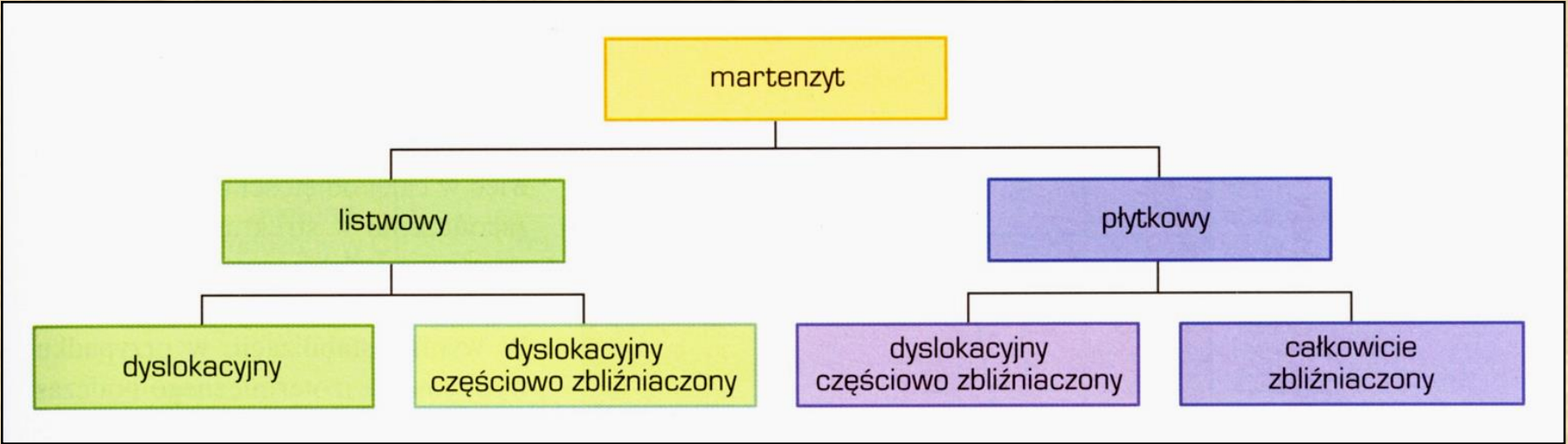
- W martenzycie częściowo zbliźniaczonym środkowa część płytki powstaje w postaci drobnych, równoległych bliźniaków przemiany zwanych **mitribem**.



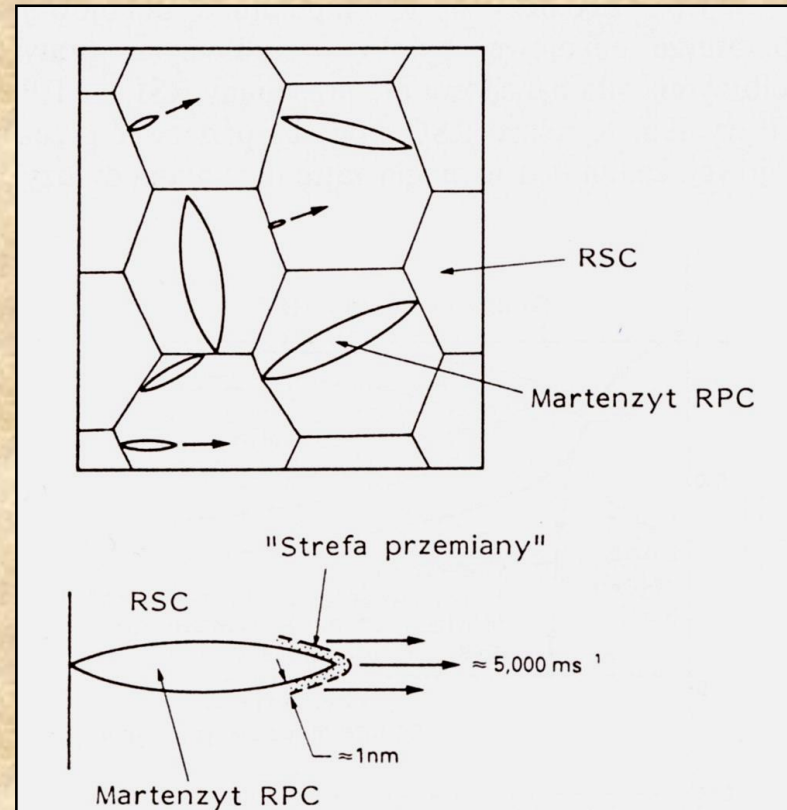
Struktura martenzytu płytkowego częściowo zbliźniaczonego pow. 30 000x TEM

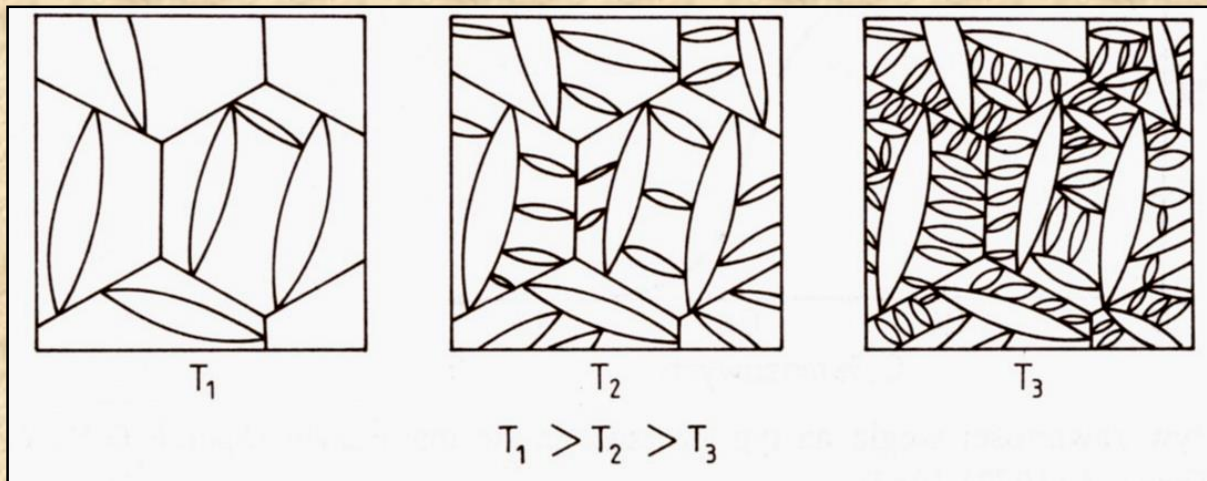


Struktura martenzytu płytkowego całkowicie zbliźniaczonego pow. 20 000x TEM



- **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**

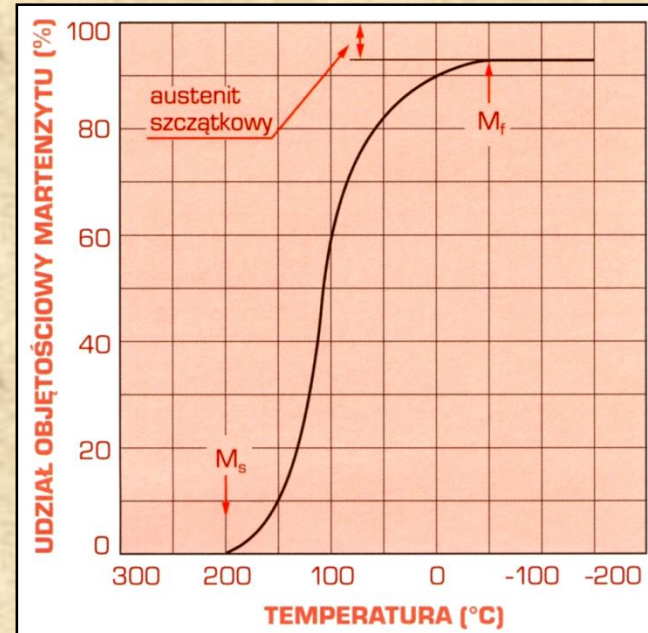




- W miarę obniżania temperatury przemiana martenzytyczna zachodzi dzięki tworzeniu się nowych płytek.
- **Na samym początku** przemiany powstają **największe płytki**, których wielkość jest ograniczona wielkością ziarna austenitu. Wzrost płytek martenzytu zachodzi dzięki migracji koherentnych granic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

Austenit szczątkowy

- **Objętość właściwa martenzytu jest około 4% 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**
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

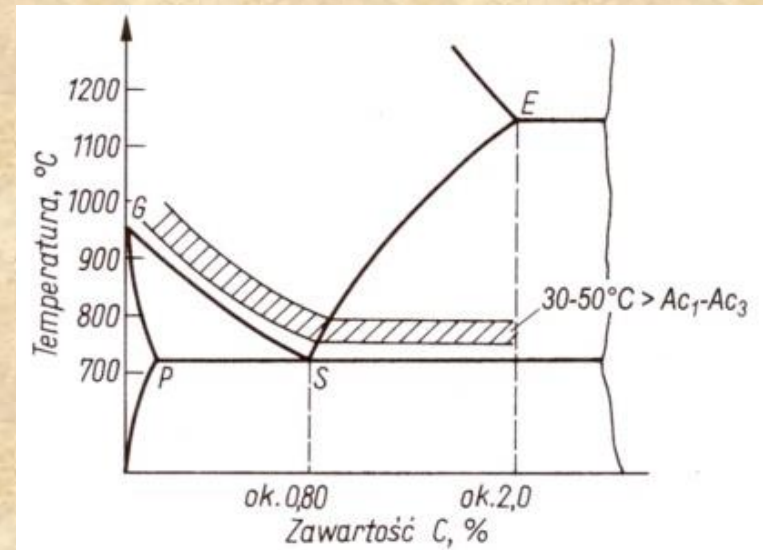
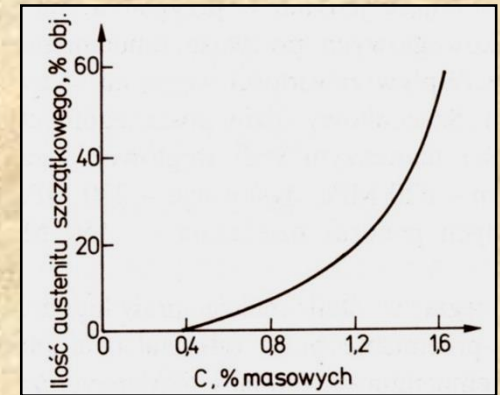
Początkowo po przekroczeniu M_s postęp przemiany jest niewielki, ale nasila się w miarę obniżania temperatury. Maksimum szybkości przemiany zostaje osiągnięte po przemianie ok. 50% austenitu, po czym znowu maleje osiągając 0 w temp. M_f pomimo, że pozostaje jeszcze pewna ilość nieprzemienionego austenitu.

Od czego zależy ilość austenitu szczątkowego?

wzrasta wraz ze zwiększeniem stężenia węgla 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.

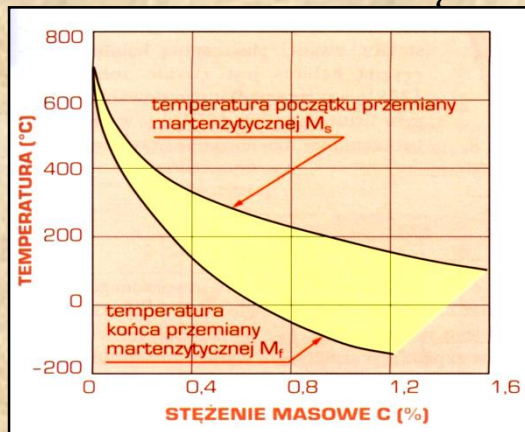


Austenit szczątkowy

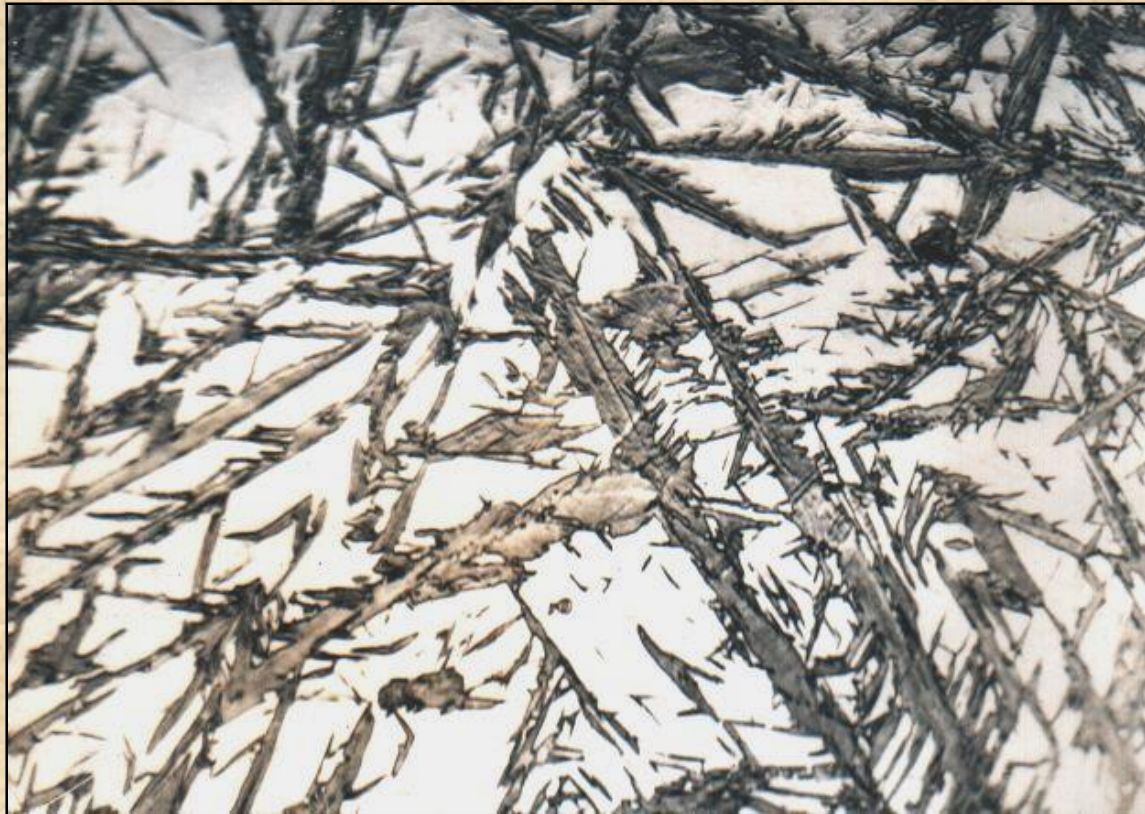
Obróbkę cieplną służącą do uzyskania struktury martenzytycznej nazywa się hartowaniem.

Oziębianie podczas hartowania jest realizowane w temp. 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.

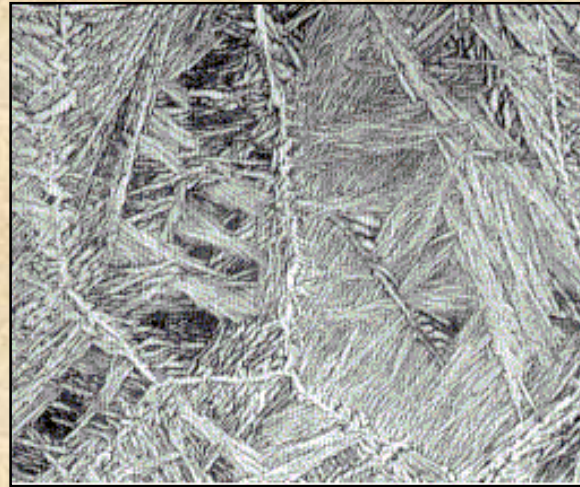


**Ciemne listwy – martenzyt,
jasne obszary austenit
szczątkowy**

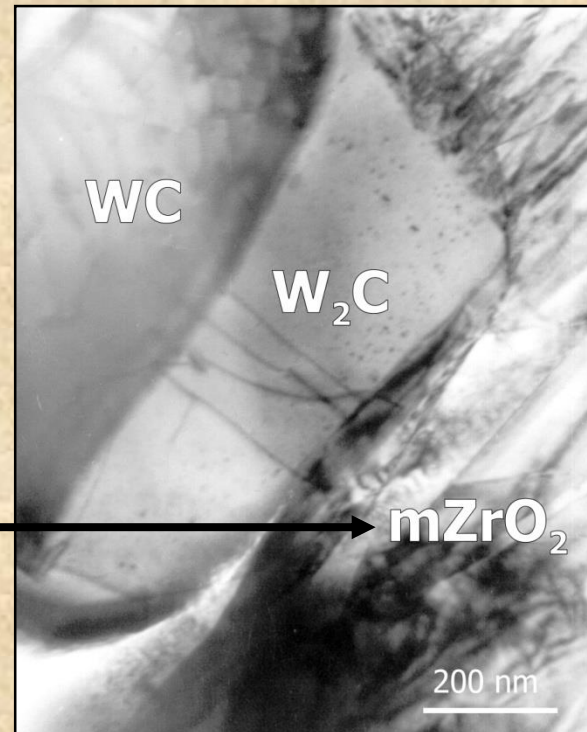


- 1. Austenit szczałkowy obniża twardość zahartowanej stali, gdyż w przeciwieństwie do martenzytu jest miękki.**
- 2. Zwiększa odporność stali na ścieranie i powierzchniową wytrzymałość zmęczeniową, zmniejsza skłonność stali do kruchego pękania.**
- 3. Wada: skłonność do pękania przy szlifowaniu, niestabilność 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 przemianie w $Ti\alpha$ krystalizującej w układzie heksagonalnym w temp. 882.5°C)
- W stopach metali (mosiądze)
- W materiałach ceramicznych (przemiana martenzytyczna $t\text{-ZrO}_2$ w $m\text{-ZrO}_2$ w temp. 950°C)
- W polimerach a nawet w związkach organicznych



Martenzyt w Ti



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)**