

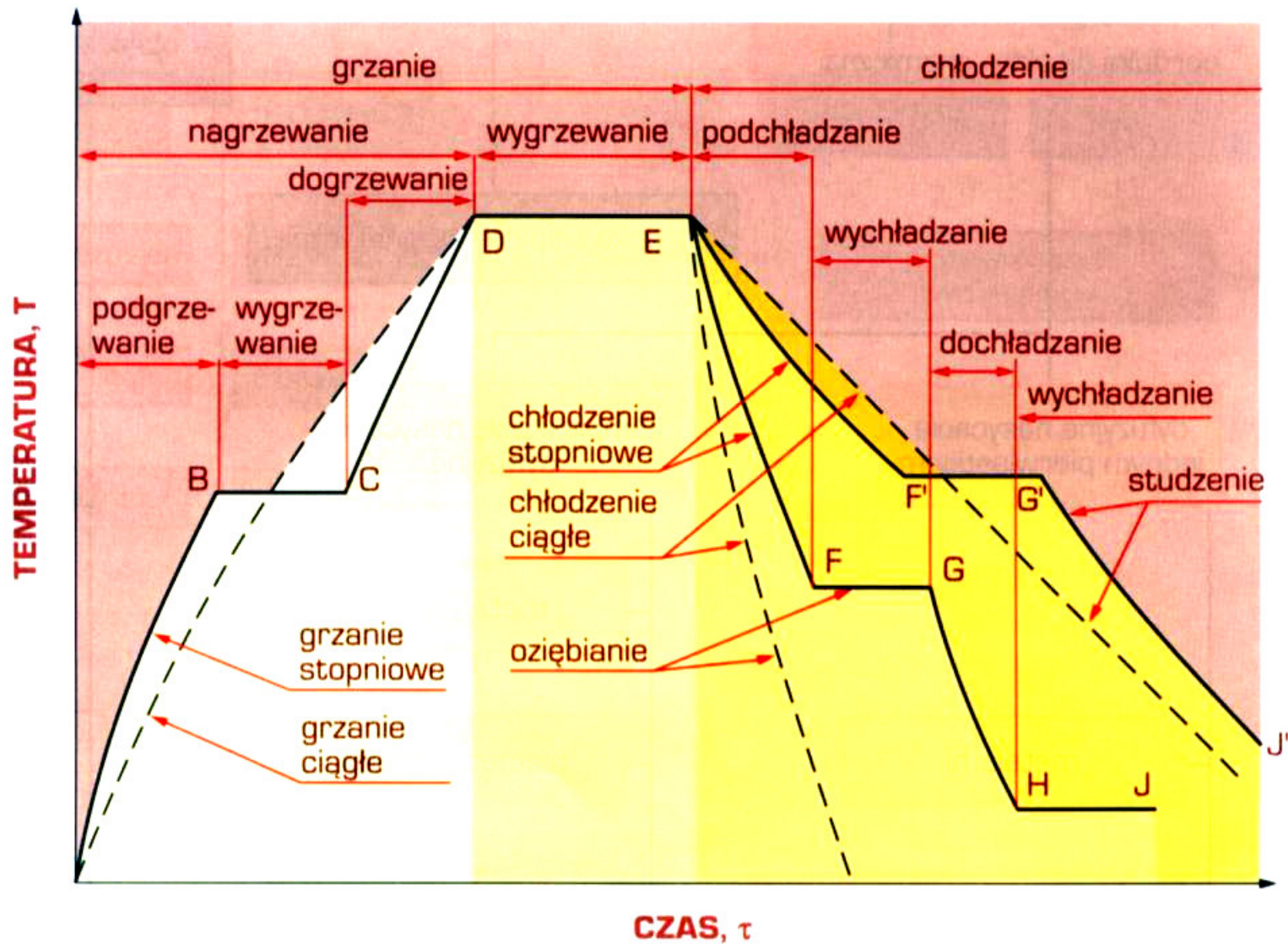
OBRÓBKA CIEPLNA

1. POJĘCIA PODSTAWOWE

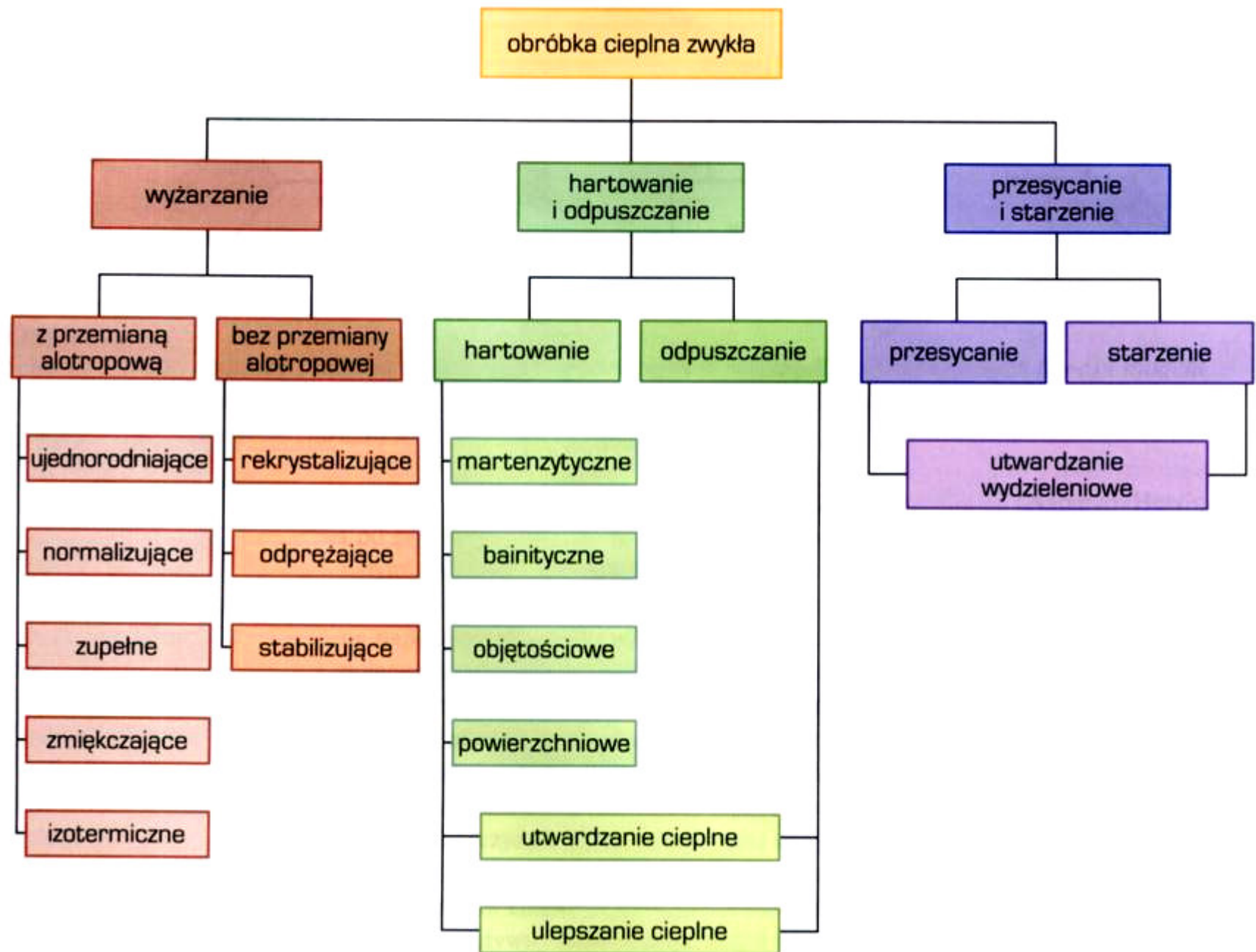
Definicja obróbki cieplnej

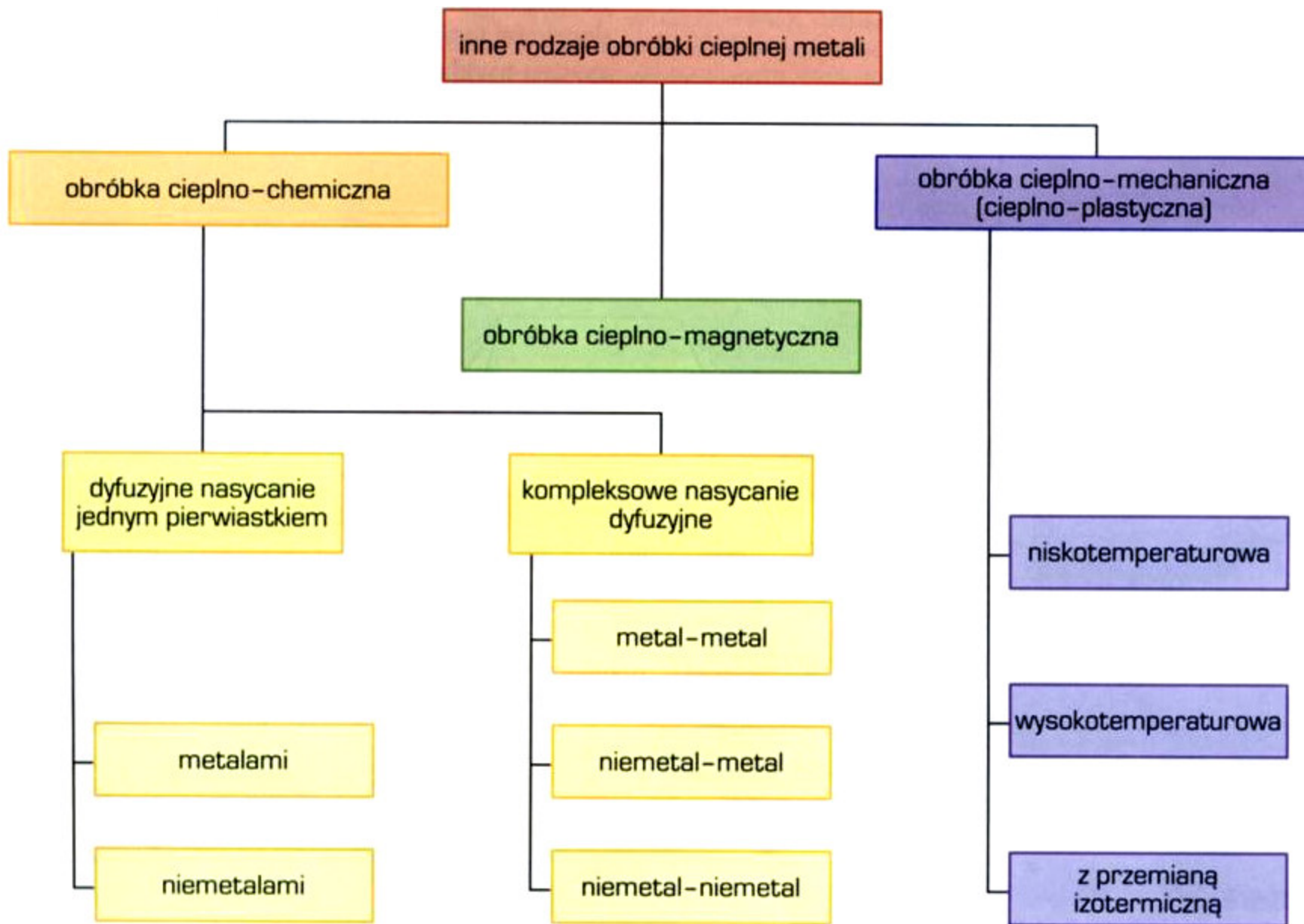
Dziedzina technologii obejmująca zespół zabiegów cieplnych powodujących zmiany struktury w stanie stałym, skutkujące poprawą właściwości metali i stopów, w wyniku działania:

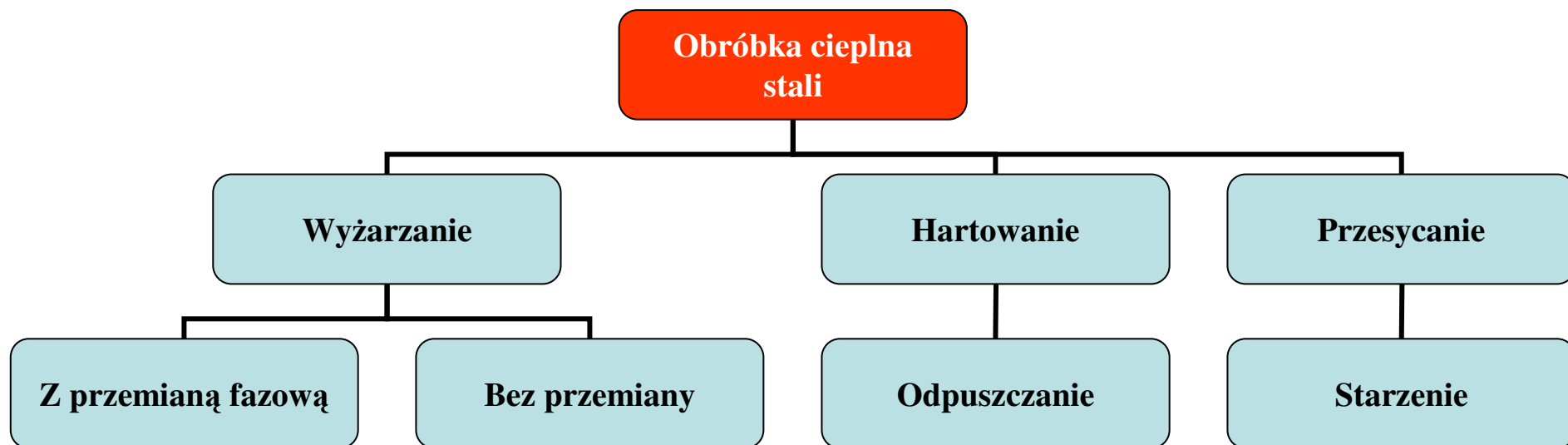
- temperatury,
- czasu i
- ośrodka

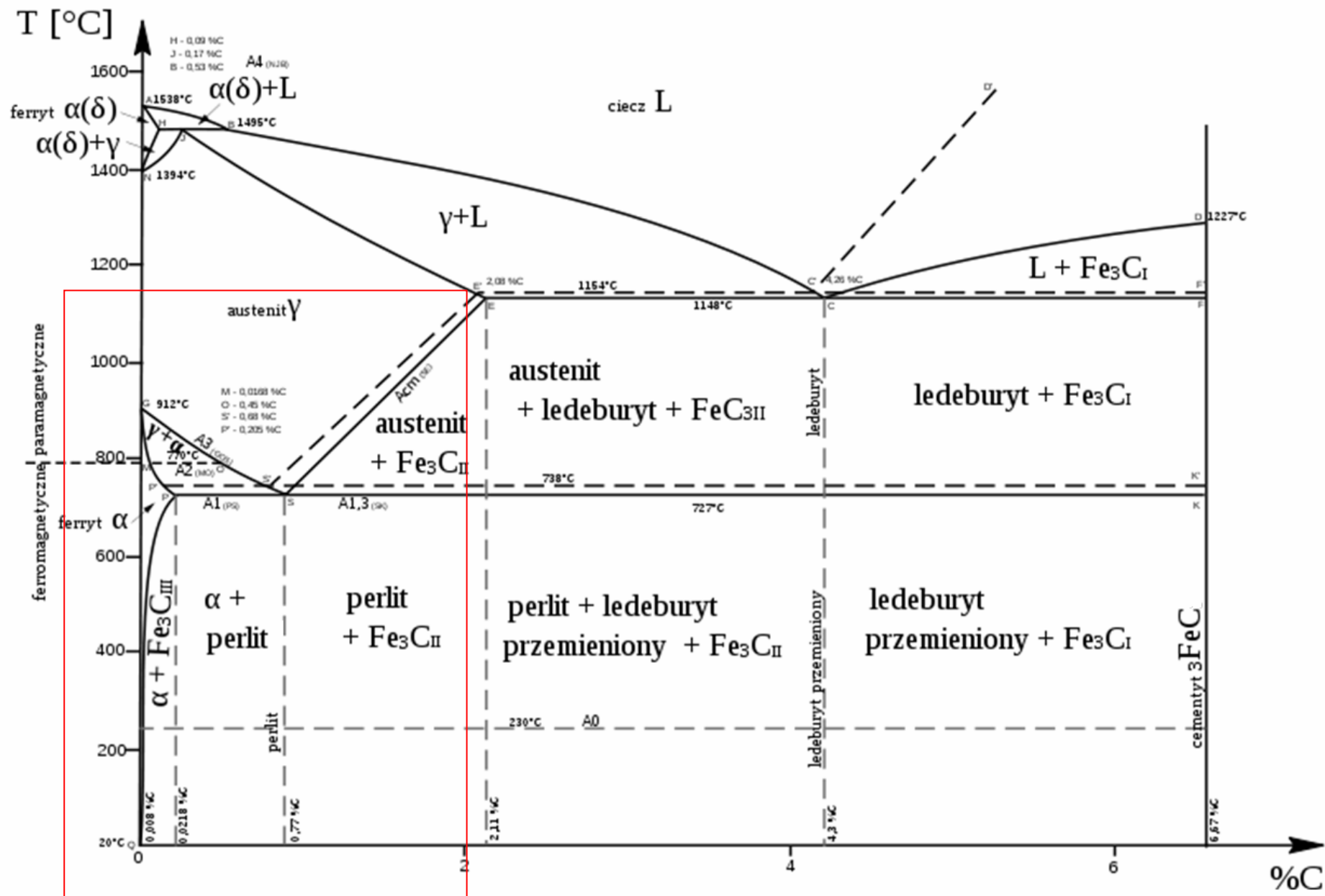


Zabiegi obróbki cieplnej. Wg.: L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo WNT, Gliwice - Warszawa 2002

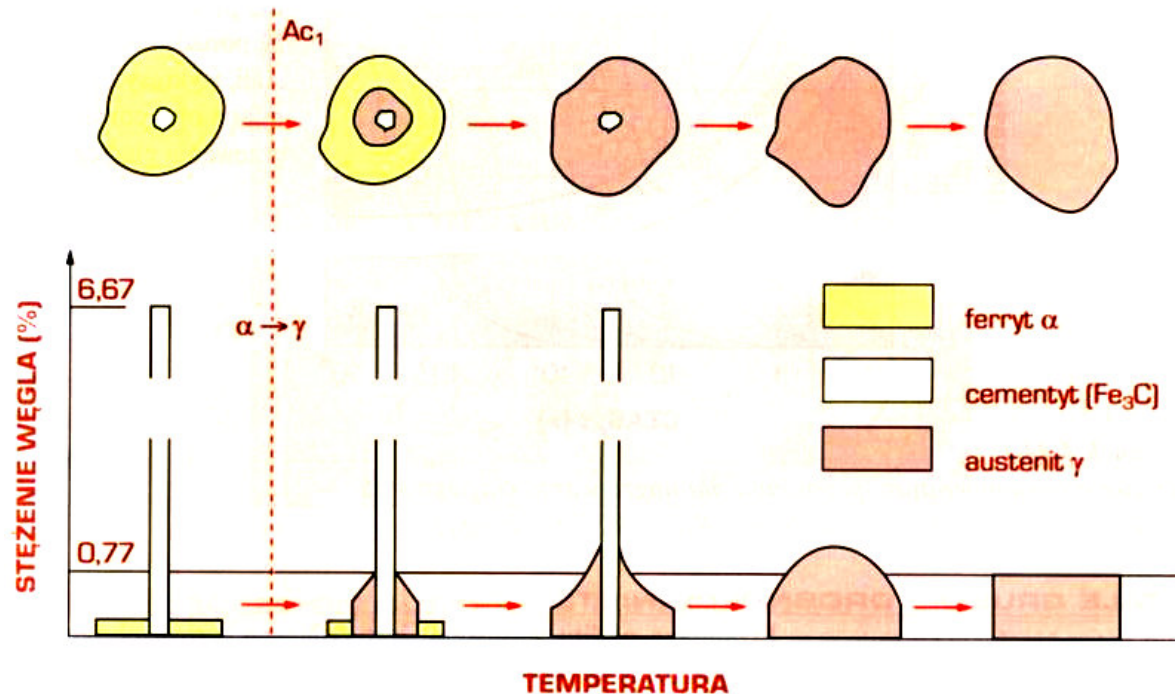








Powstawanie austenitu podczas nagrzewania

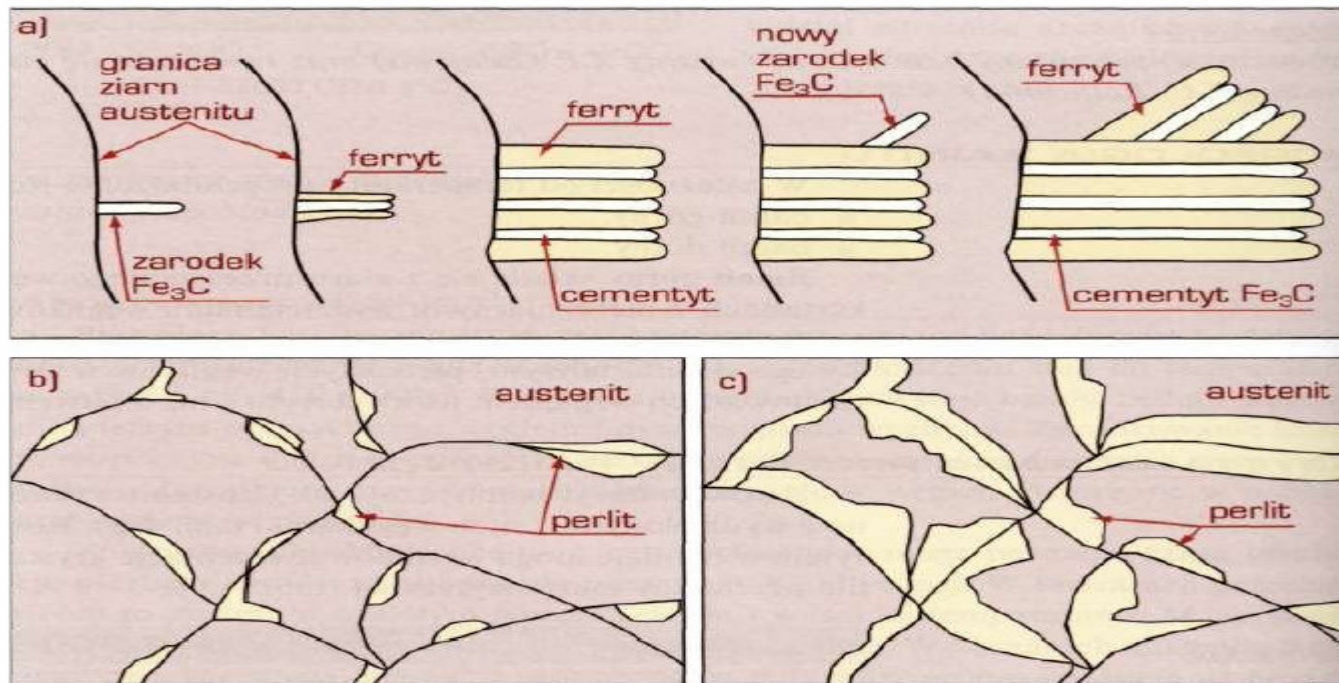


1. Ziarno perlitu = płytki ferrytu α + płytki cementytu Fe_3C
2. Utworzenie zarodków austenitu γ w płytkach ferrytu α
3. Rozrost zarodków austenitu i stopniowe rozpuszczanie cementytu w austenicie
4. Drobne ziarna austenitu

Podczas przejścia przez zakres temperatur A_{C1} zawsze następuje rozdrobnienie struktury ponieważ jeden obszar (ziarno) perlitu rozpada się na wiele ziaren austenitu!

Przemiana perlityczna

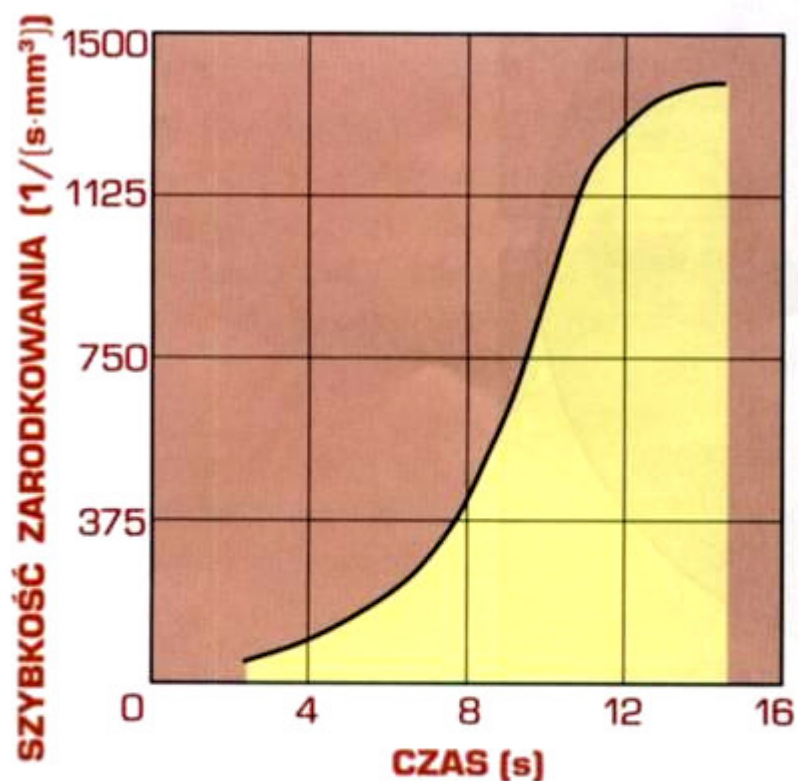
- Zachodzi przy ochłodzeniu austenitu nieznacznie poniżej temperatury A_{r1}
- Perlit: mieszanina eutektoidalna złożona z płytek ferrytu oraz cementytu
- Przemiana dyfuzyjna związana z przegrupowaniem atomów węgla, zachodząca przez zarodkowanie i wzrost zarodków
- Zarodkowanie heterogeniczne na cząstkach cementytu, płytkach ferrytu, a w austenicie na granicach jego ziarn
- Kolejno tworzenie płytek cementytu i ferrytu



Mechanizm przemiany austenitu w perlit przy powolnym chłodzeniu (studzeniu):

- po przekroczeniu temperatury Ar_1 (temperatura A_1 przy chłodzeniu) na granicach ziaren austenitu powstają zarodki cementytu,
- zarodki cementytu rozrastają się w głąb ziaren austenitu, tworząc płytki prostopadłe do granic ziaren,
- austenit otaczający płytki cementytu ubożeje w węgiel i przemienia się w ferryt w postaci płytek po obu stronach cementytu,
- nadmiar węgla z powstającego ferrytu dyfunduje do otaczającego austenitu, co umożliwia tworzenie nowych zarodków cementytu.

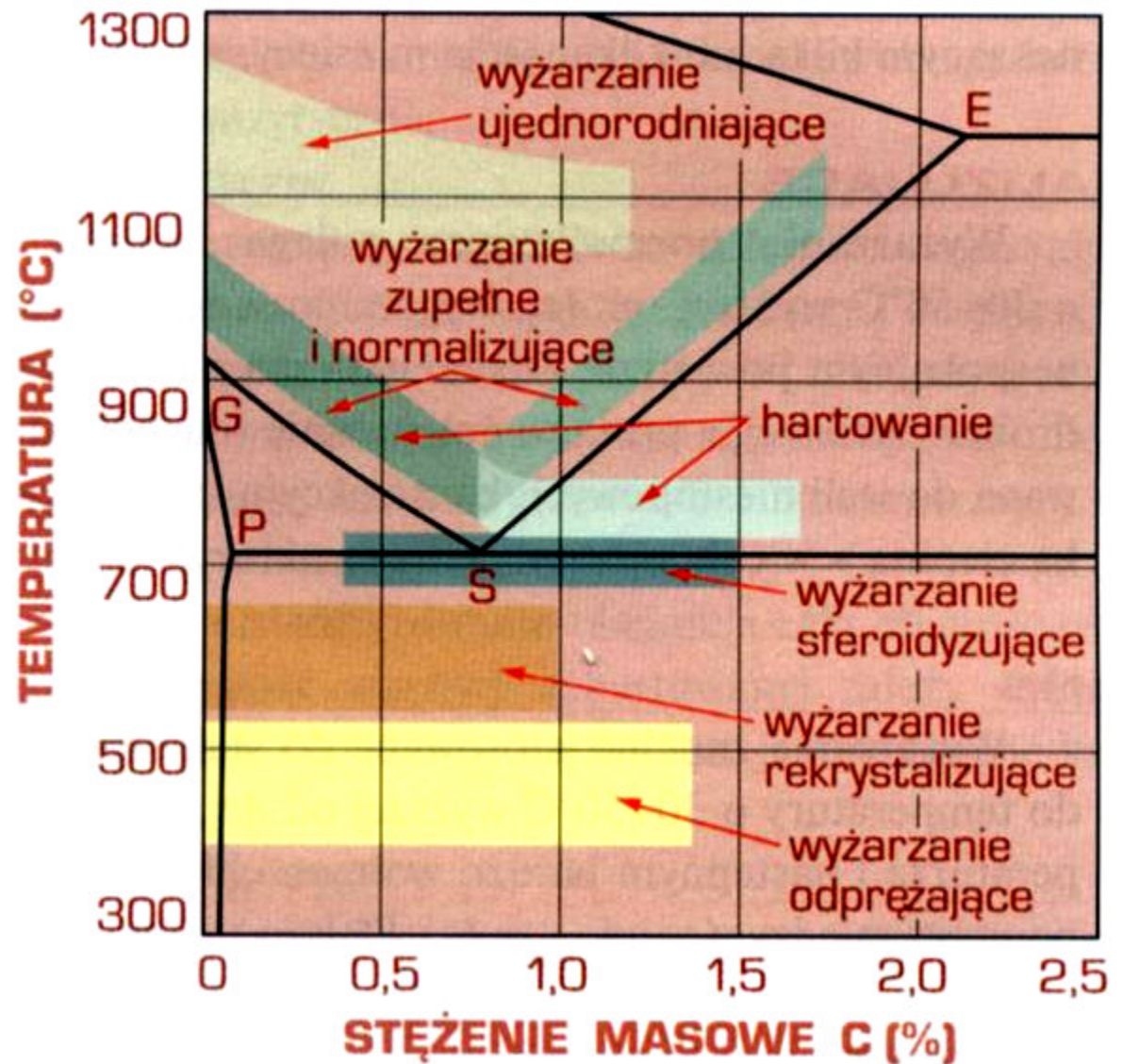
Kinetyka przemiany perlitycznej



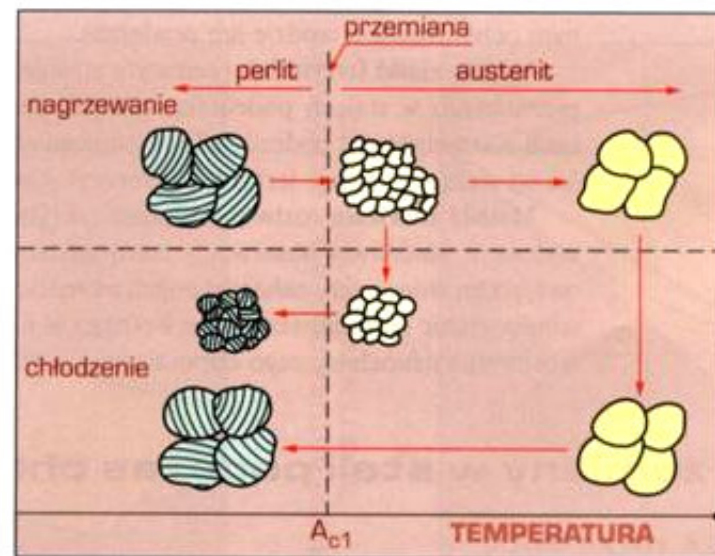
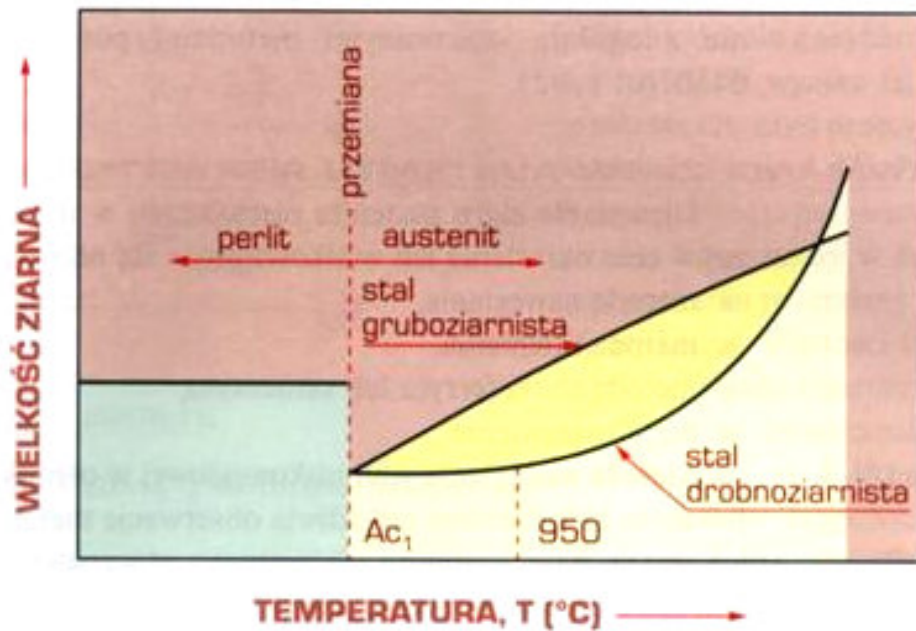
Zależność szybkości zarodkowania perlitu od czasu przy przechłodzeniu stali eutektoidalnej do temperatury 680°C (według R.F. Mehla i A. Dubego)

Wyżarzanie

nagrzanie stali do określonej temperatury, wygrzanie i studzenie w celu uzyskania struktury zbliżonej do stanu równowagi



Zmiany wielkości ziarna



Wyżarzanie:

- **Ujednorodniające**: dla wlewków stalowych w celu ograniczenia niejednorodności spowodowanej mikrosegregacją i likwacją
- **Normalizujące**: uzyskanie jednorodnej struktury drobnoziarnistej, do stali niestopowych i staliw
- **Zupełne**: do stali stopowych
- **Izotermiczne**: odmiana wyżarzania zupełnego do stali stopowych (patentowanie – do drutów)
- **Sferoidyzujące** (zmiękczone): zapewnia dobrą skrawalność i udarność, prowadzi do otrzymania sferoidytu
- **Rekrystalizujące**: usuwa umocnienie zgmiotowe umożliwiając obróbkę plastyczną na zimno
- **Odprężające**: usuwa naprężenia odlewnicze, spawalnicze, cieplne (stabilizujące do 150 C – zapewnienie niezmienności wymiarowej; sezonowanie – w temperaturze pokojowej)

Wykresy przemian austenitu podczas chłodzenia

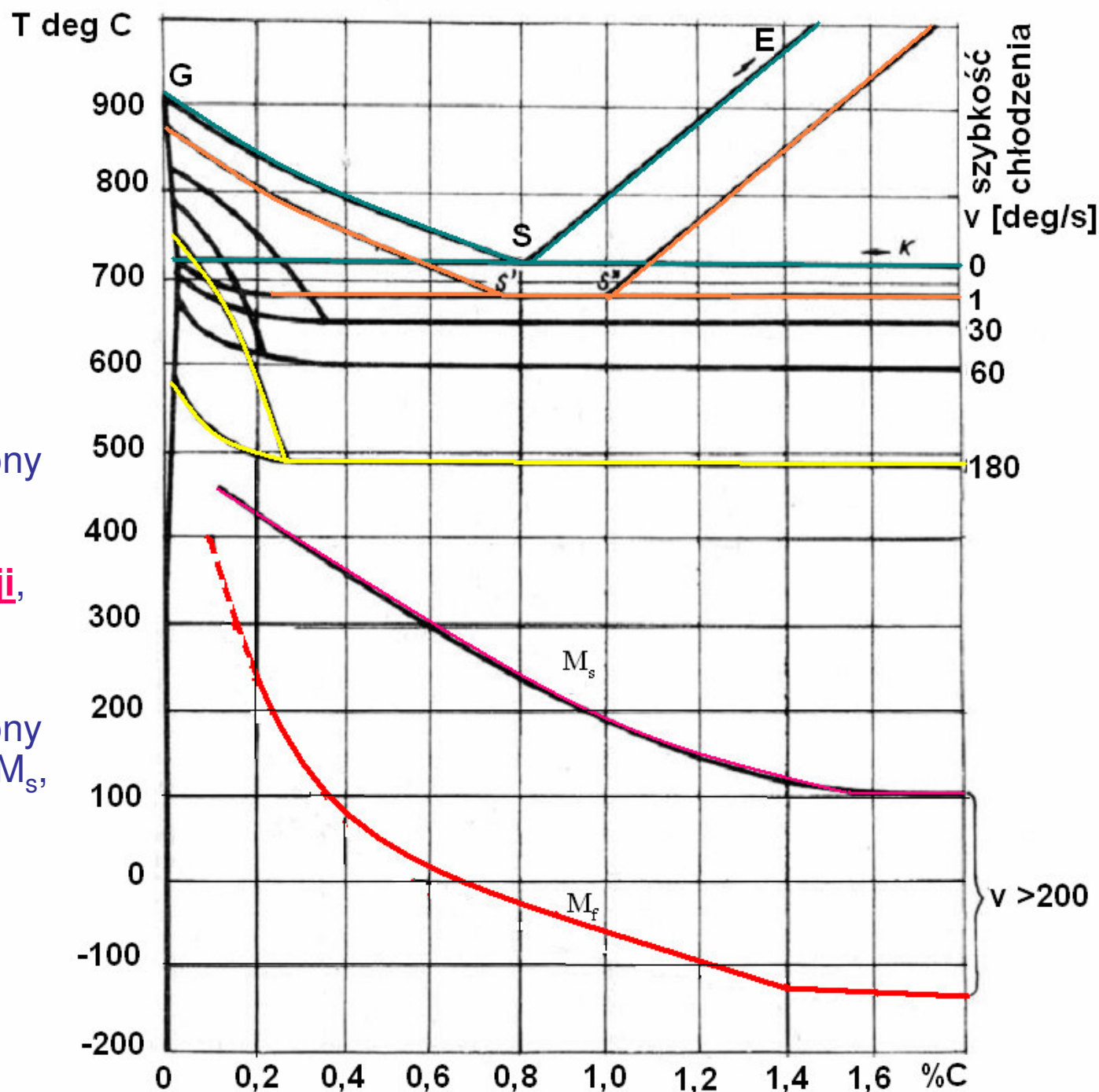
Krzywe czas-temperatura-przemiana CTP:

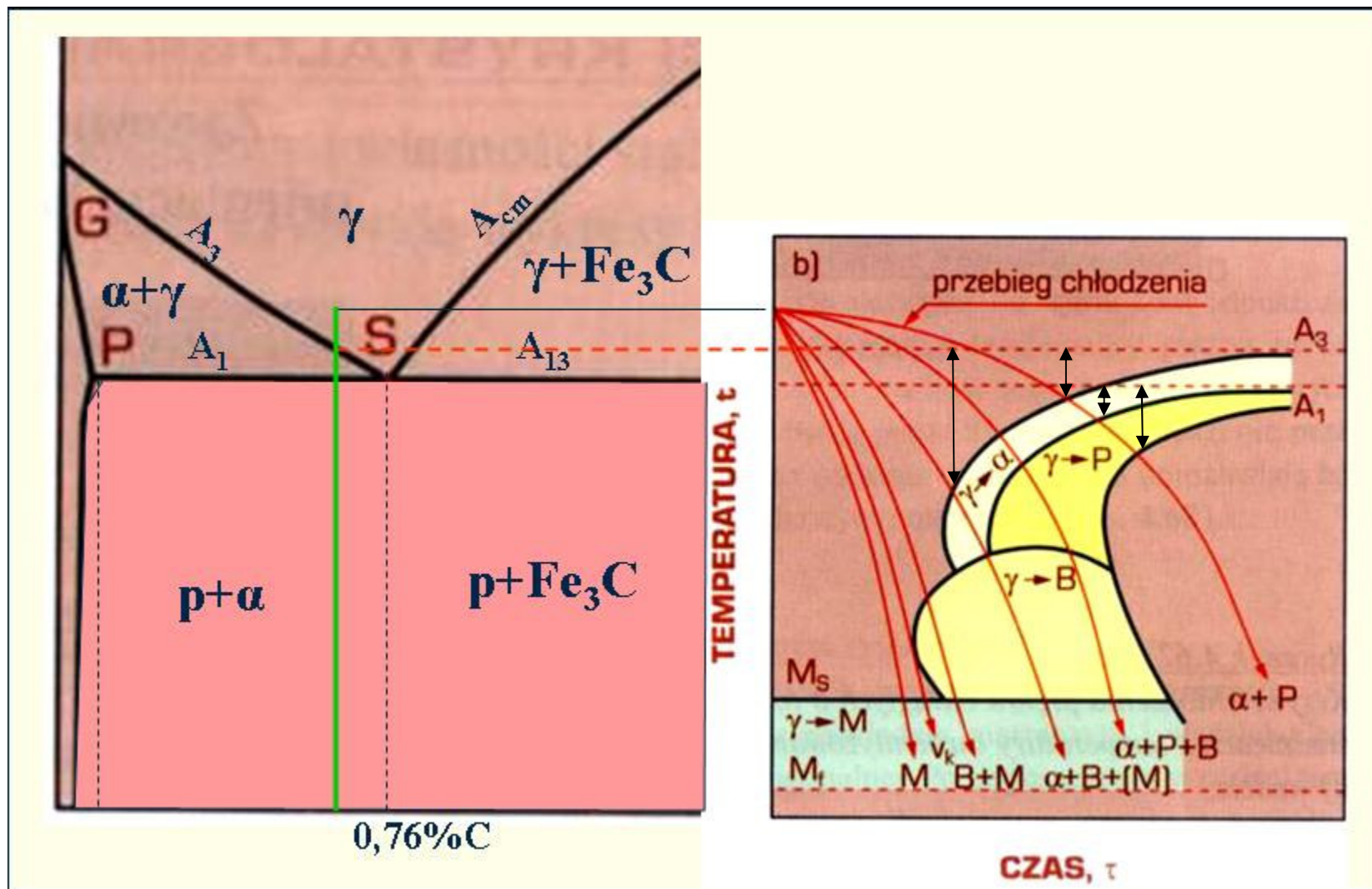
- CTP_i przy chłodzeniu izotermicznym
- CTP_c przy chłodzeniu ciągłym

Wpływ prędkości chłodzenia na wykres Fe-Fe₃C

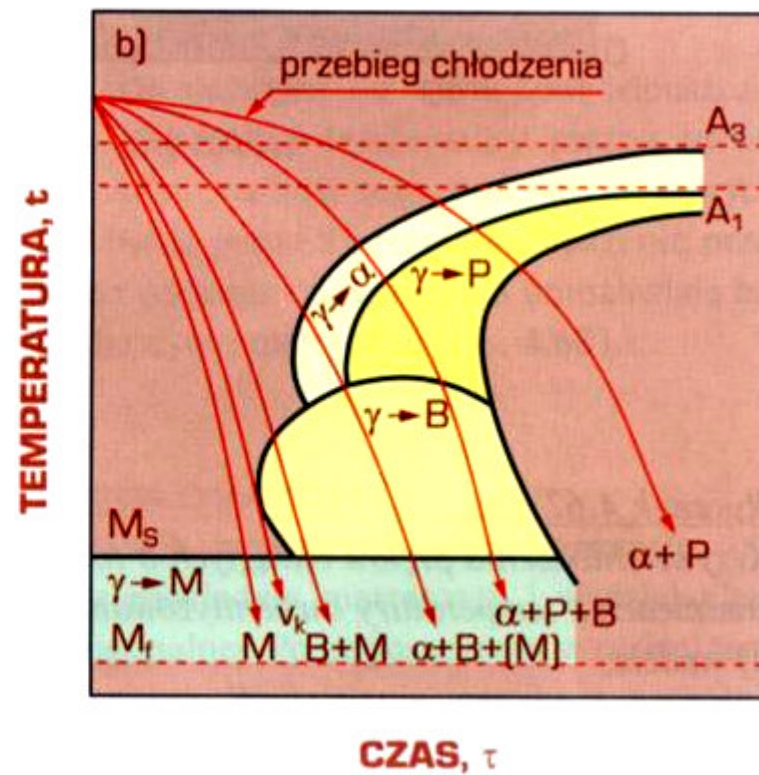
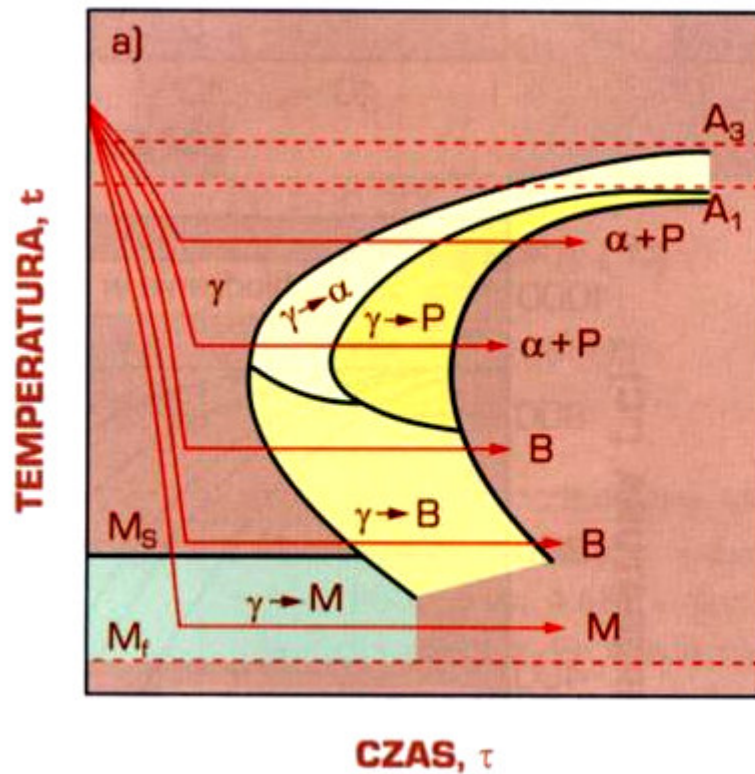
Austenit przechłodzony
poniżej około 550°,
przy znacznie
ograniczonej dyfuzji,
ulega przemianie w
bainit.

Austenit przechłodzony
poniżej temperatury M_s ,
bez udziału dyfuzji
przemienia się w
martenzyt.



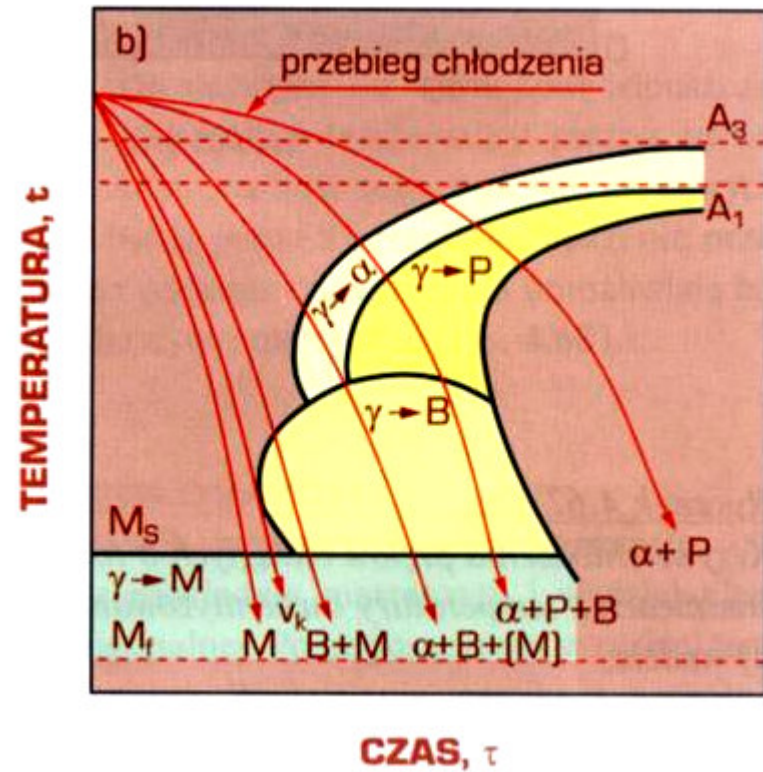


Krzywe CTP



Przemiany w stali podczas chłodzenia

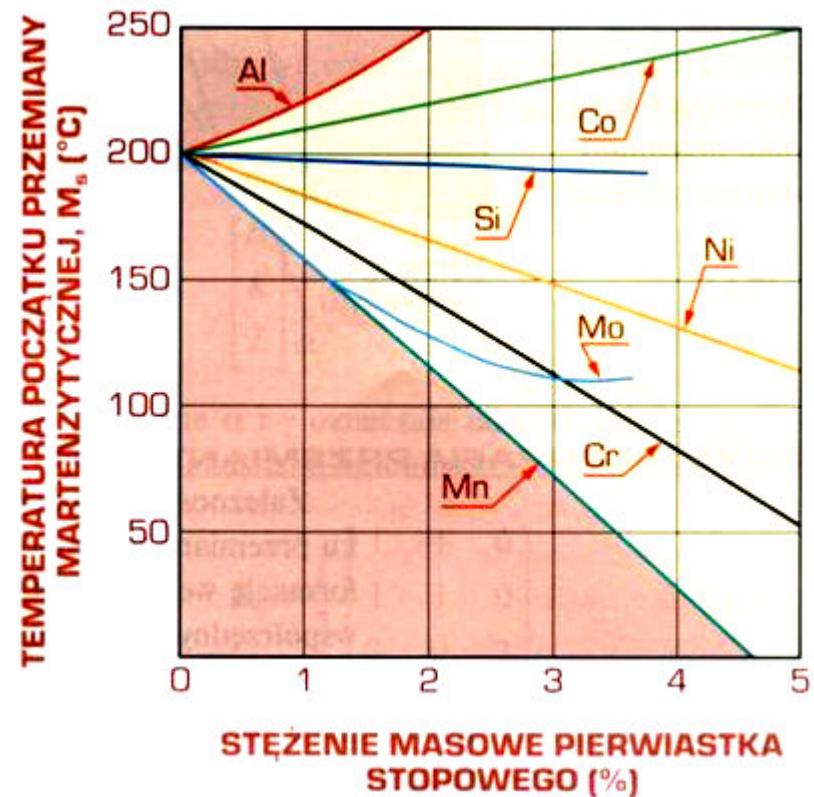
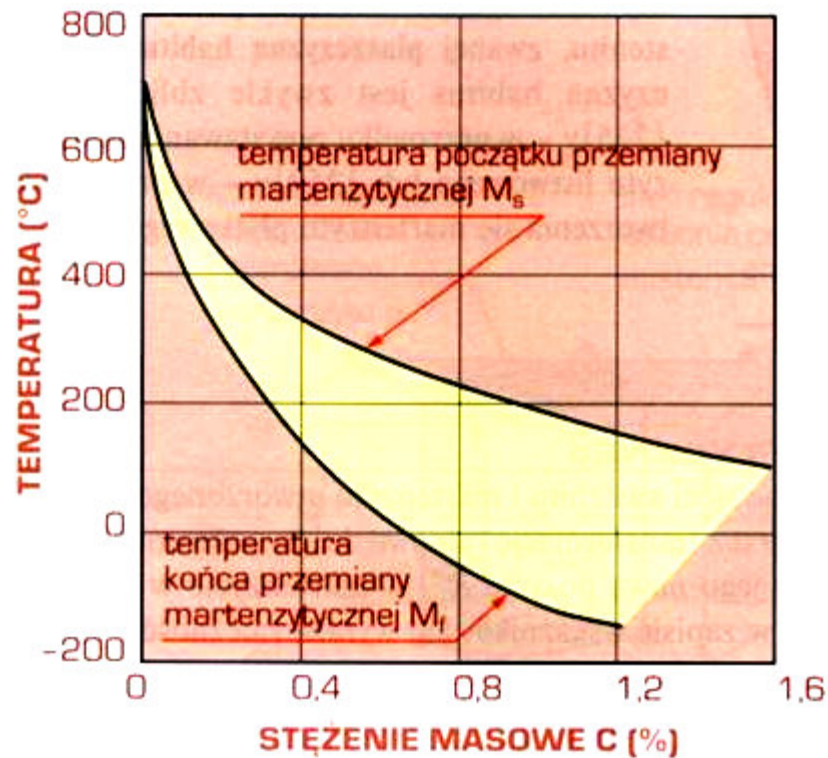
- Perlityczna
- Bainityczna
- Martenzytyczna



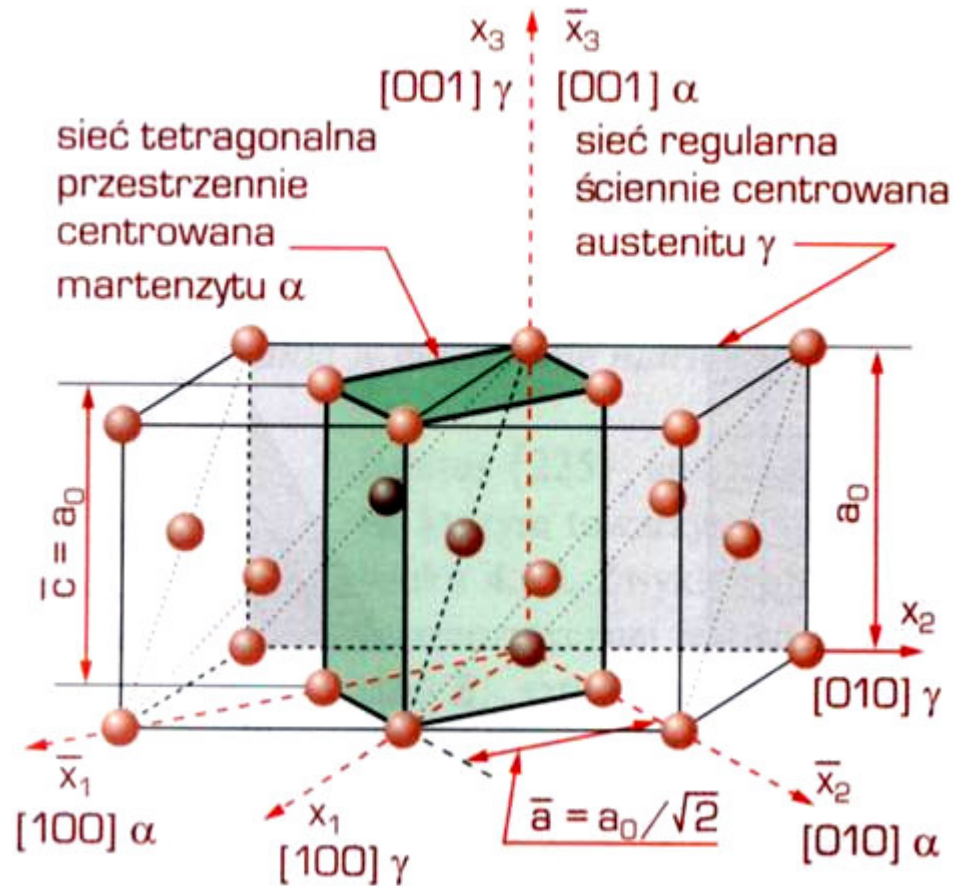
Przemiana martenzytyczna

- Istotą przemiany martenzytycznej jest **przebudowa sieci** austenitu (RSC) na tetragonalną przestrzennie centrowaną sieć martenzytu, bez udziału dyfuzji, co oznacza niewielkie przemieszczenie atomów – rzędu ułamka odległości międzyatomowej.
- Martenzyt zawiera tyle samo węgla co austenit, z którego powstał, czyli znacznie więcej niż może rozpuścić $\text{Fe}\alpha$ (max. 0,022%). Stąd **martenzyt** definiuje się jako **przesycony roztwór stały węgla w $\text{Fe}\alpha$** .

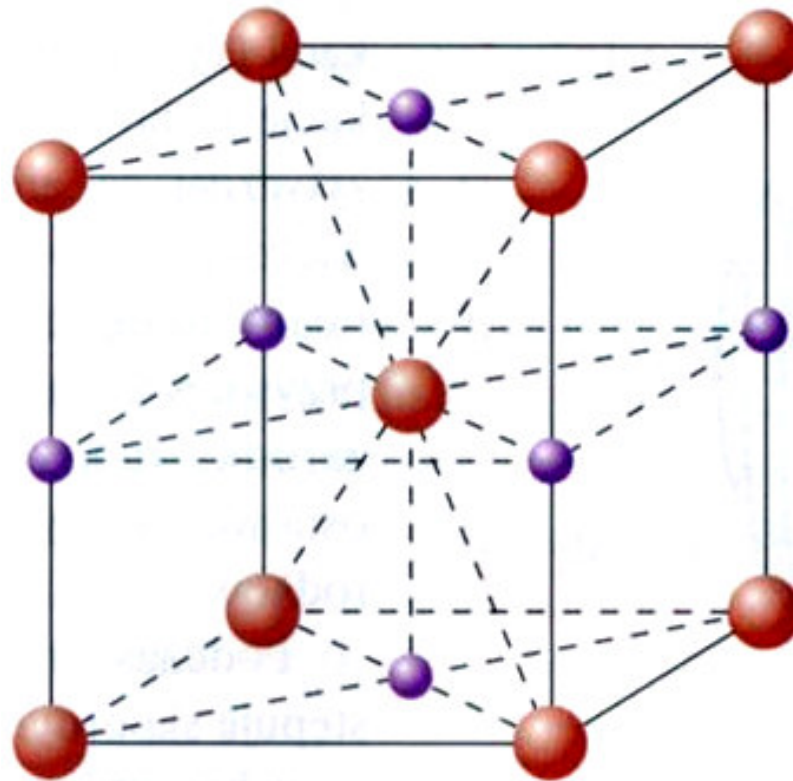
- Przemiana bezdyfuzyjna przy dużym przechłodzeniu austenitu z szybkością większą od krytycznej v_k .
- Martenzyt – przesycony roztwór węgla w żelazie Fe_α .
- Warunek przemiany – ciągłe obniżanie temperatury w zakresie M_s do M_f .
- Wartości M_s i M_f zależą od składu chemicznego austenitu.



Krystalografia przemiany martenzytycznej



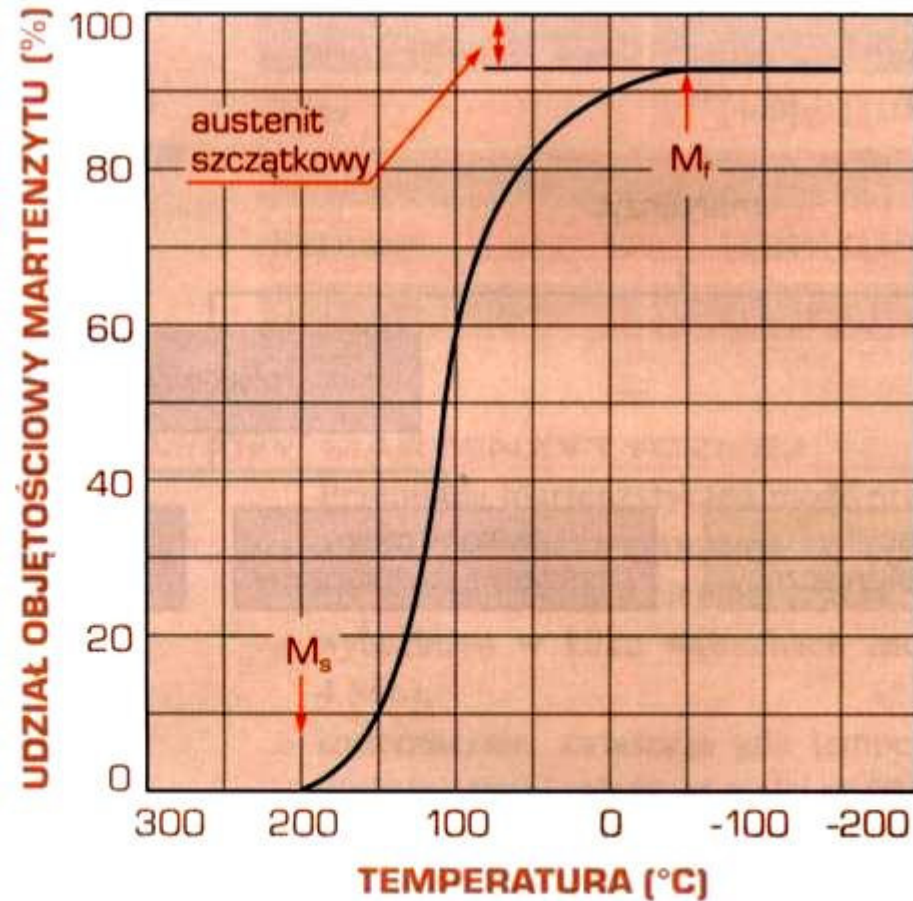
Przemiana martenzytyczna



● – atomy Fe



● – atomy C – możliwe pozycje

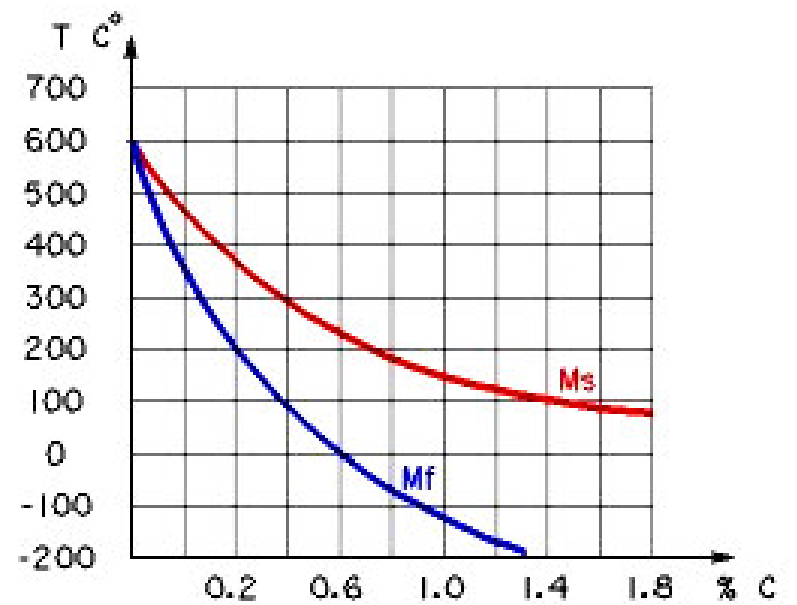
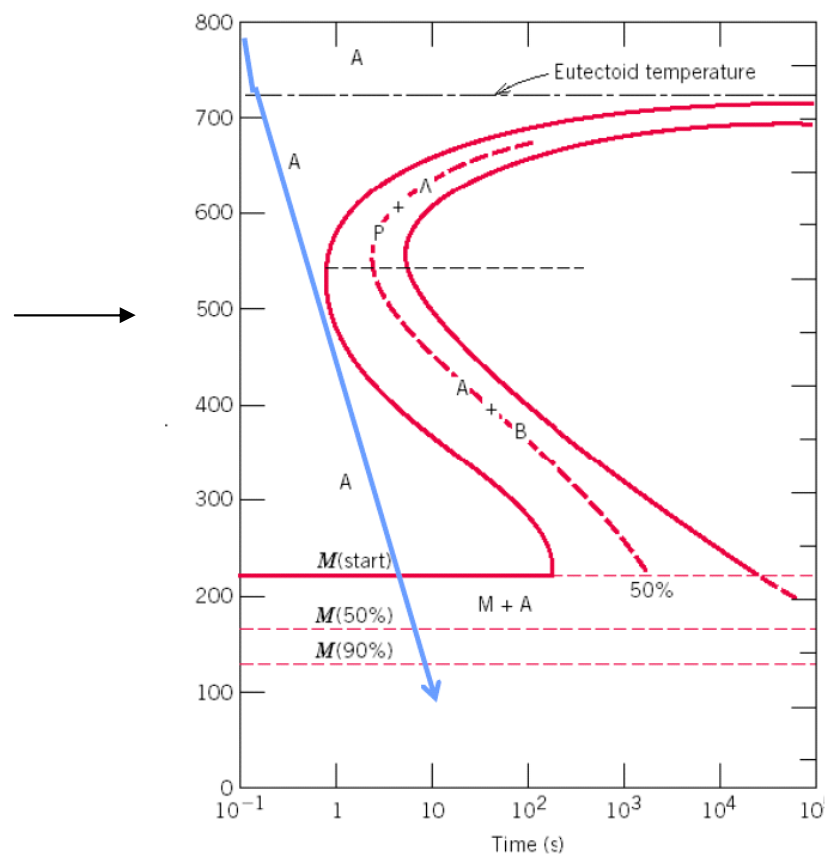
Austenit szczątkowy



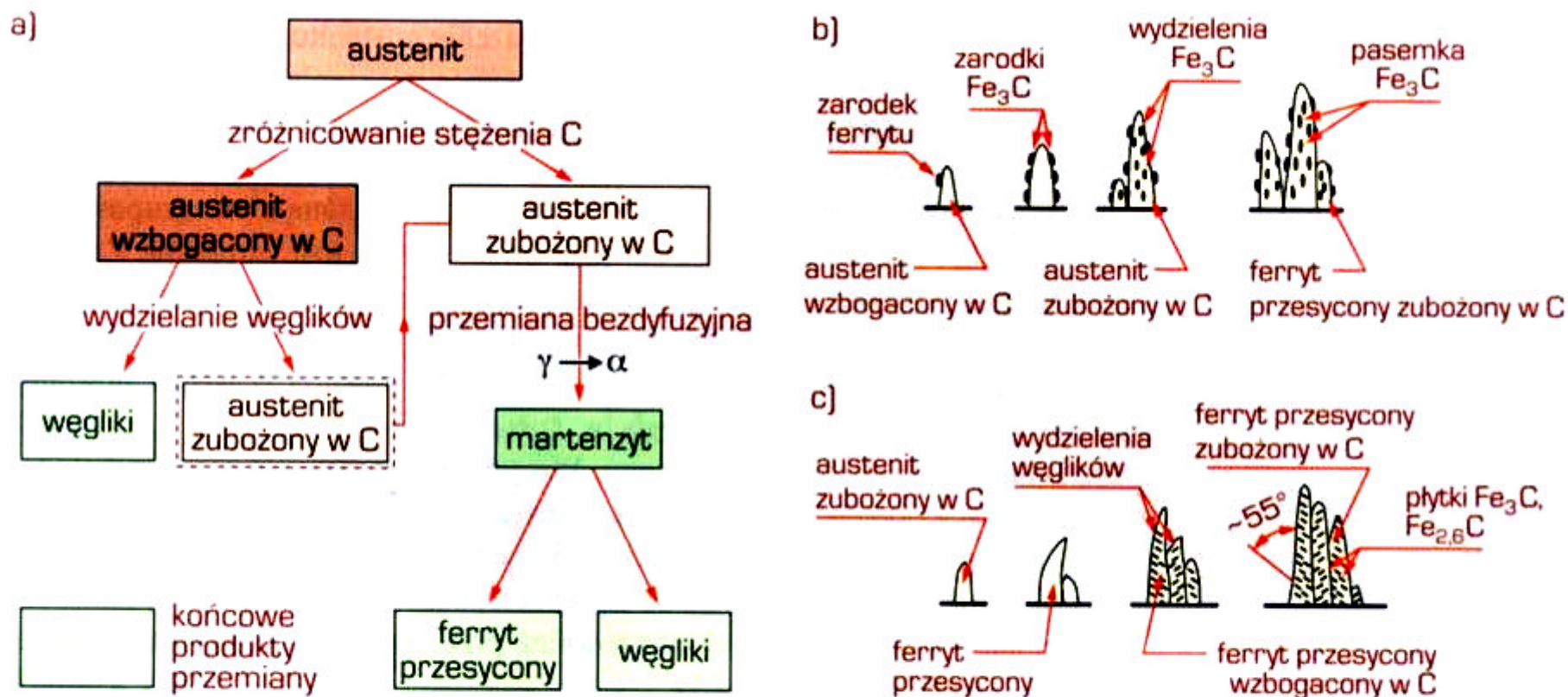
Zależność udziału martenzytu w strukturze stali o stężeniu ok. 1,0% C i 1,5% Cr od temperatury przechłodzenia

Przemiana bainityczna

- Przemiana bainityczna ma **charakter mieszany**: bezdyfuzyjny i dyfuzyjny.
- Zachodzi przy przechłodzeniu stali do 450-200°C. 
- Produktem przemiany jest bainit, tj. mieszanina ferrytu przesyconego węglem i węglików o dużym stopniu dyspersji.
- Przemianę rozpoczyna dyfuzja **węgla w austenicie – do granic ziaren i dyslokacji**.
- Podczas okresu inkubacji powstają miejsca zubożone i wzbogacone w węgiel.
- W obszarach o **mniej**szym stężeniu C i **wyższej** temperaturze M_s ma miejsce przemiana **martenzytyczna**, a w obszarach o **wyższym** stężeniu - wydzielanie drobnych cząstek węglików. 



- W czasie dalszego chłodzenia, w obszarach **martenzytycznych** następuje wydzielanie węglików, a osnowa staje się ferrytem przesyconym węglem.
- Rozrost bainitu kontrolowany jest **szybkością dyfuzji węgla** w austenicie, a nie szybkością przemiany martenzytycznej.
- W górnym zakresie temperatur przemiany powstaje bainit górny. Przemiana rozpoczyna się od przemiany austenitu zubożonego w węgiel w niskowęglowy ferryt.
- W dolnym zakresie temperatur powstaje bainit dolny. Pierwszy etap - przemiana martenzytyczna austenitu bez zmiany składu chemicznego, a następnie wydzielenie węglików.

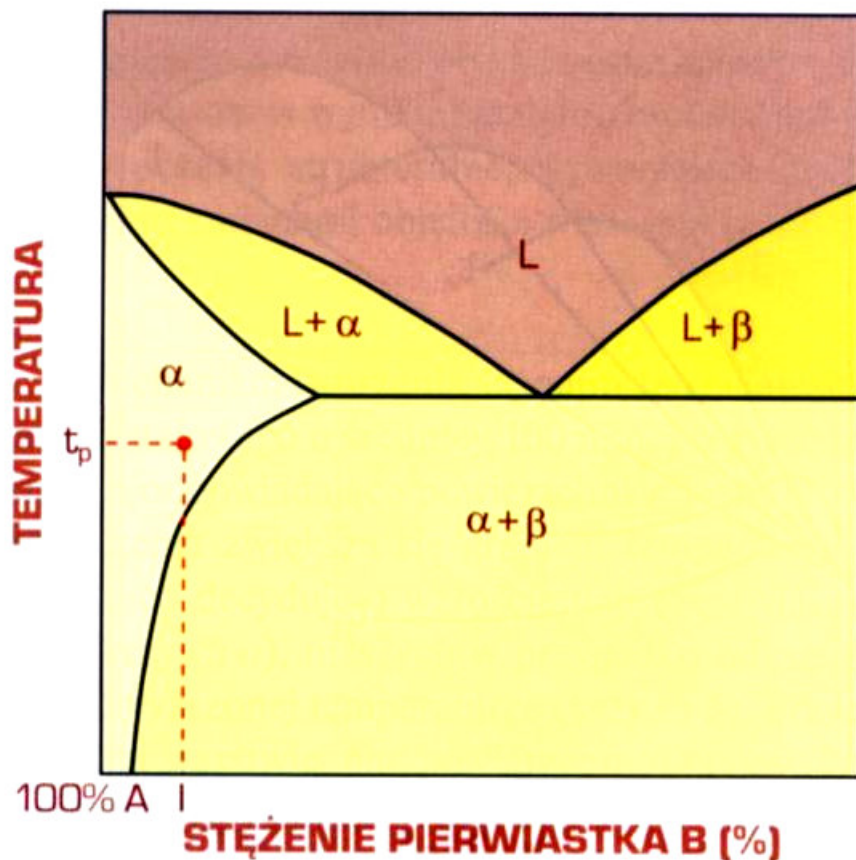


Schematy a) przemiany bainitycznej (według A.P. Gulajewa) oraz tworzenia się bainitu: b) górnego i c) dolnego (według E.C. Rollasona)

Morfologia bainitu

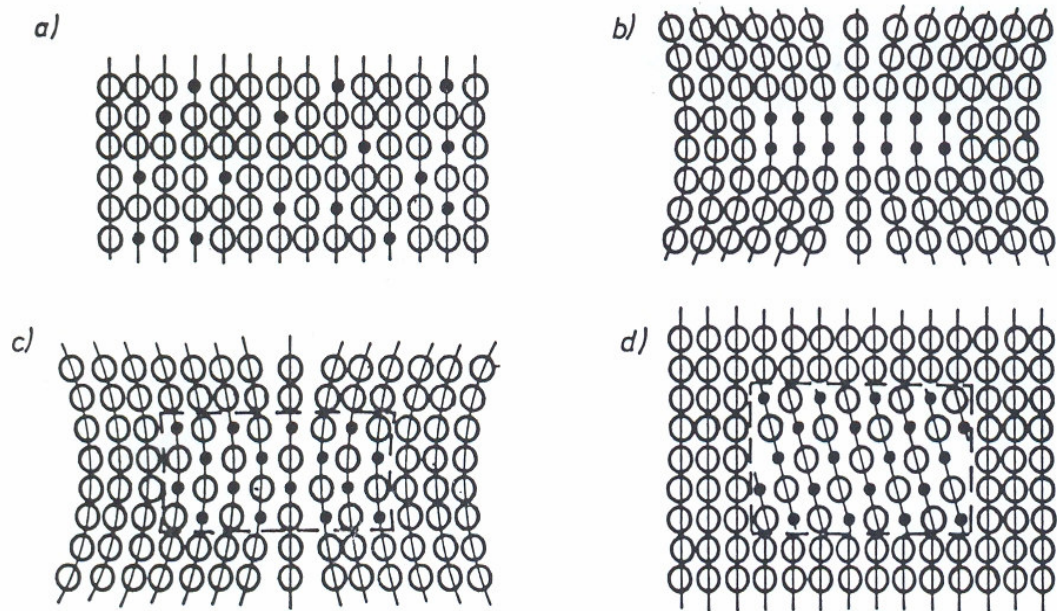
- Bainit górny: ziarna przesyconego węglem ferrytu o nieregularnych kształtach z nieregularnymi wydzieleniami węglików oraz austenit szczątkowy
- Bainit dolny: przesycony węglem ferryt o postaci listwowej, zbliżony do martenzytu, płytkowe węgliki w równoległych rzędach ściśle zorientowane względem ferrytu oraz austenit szczątkowy

Utwardzanie wydzieleniowe: przesycanie i starzenie



- Przesycanie: nagrzanie dwufazowego stopu do temp. 30-50° C powyżej krzywej granicznej rozpuszczalności i szybkie schłodzenie do temperatury pokojowej; stop uzyskuje metastabilną strukturę jednofazową

- Przesycanie**: nagrzanie dwufazowego stopu do temp. 30-50° C powyżej krzywej granicznej rozpuszczalności i szybkie schłodzenie do temperatury pokojowej; stop uzyskuje metastabilną strukturę jednofazową
- Starzenie**: nagrzanie stopu przesyconego do temperatury niższej od granicznej rozpuszczalności, wygrzanie i studzenie; wzrost własności wytrzymałościowych; powstawanie faz koherentnie związanych z osnową, *przy przestarzeniu zanik koherencji i koagulacja wydzieleni, a tym samym zanik efektu starzenia*; starzenie naturalne – w temperaturze pokojowej i sztuczne - w temperaturze podwyższonej
- Przesycanie stosowane jest typową obróbką cieplną stali austenitycznych odpornych na korozję, utwardzanie dyspersyjne – stosowane jest głównie do stopów aluminium



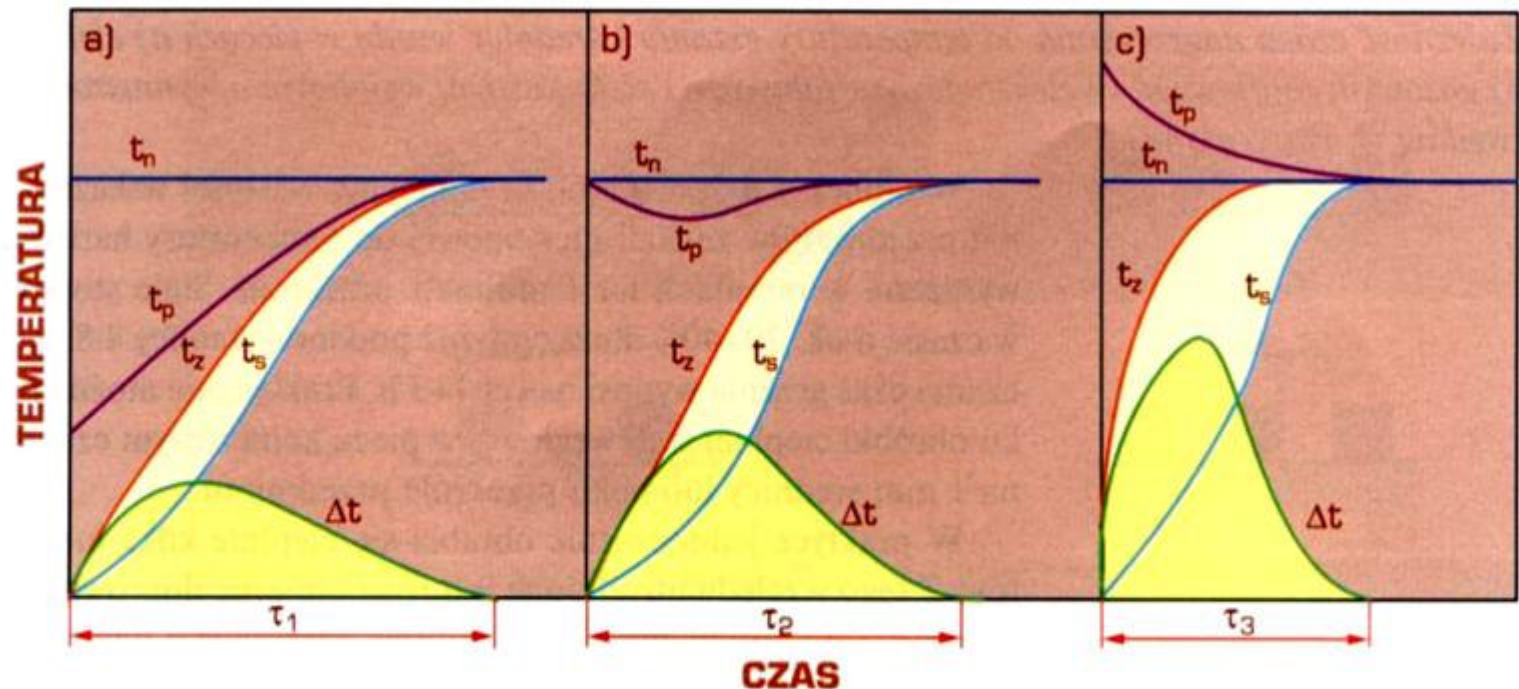
Schemat przemian strukturalnych podczas starzenia w stopie EN AC-AlCu4MgTi:

- a) jednorodny, przesycony roztwór Cu w Al, b) skupienie atomów Cu w określonych płaszczyznach,
- c) powstania koherentnej fazy Θ'' lub Θ' , d) utworzenie fazy Θ (Al₂Cu) – przestarczenie!

Technologia zwykłej obróbki cieplnej

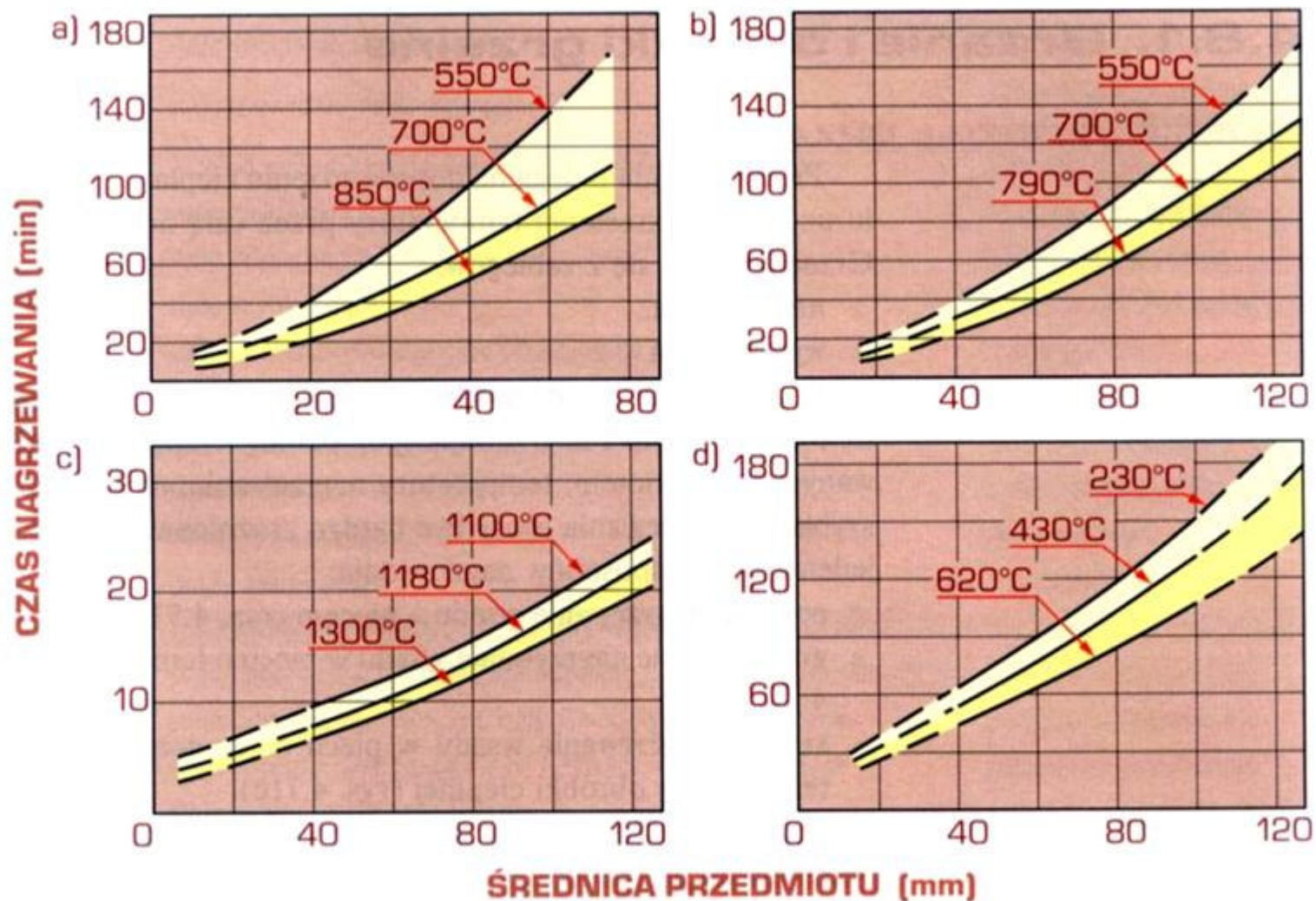
Grzanie

- Proces doprowadzenia ciepła w ciągu założonego czasu w celu uzyskania założonej, jednakowej temperatury w całej masie grzanego elementu
- Wyróżnia się zabieg nagrzewania i wygrzewania
- Nagrzewanie: a,b,c



Schematyczne przebiegi nagrzewania a) powolnego, b) przyspieszonego, c) szybkiego;
 t_n - temperatura nagrzewania, t_p - temperatura pieca, t_z - temperatura powierzchni wsadu,
 t_s - temperatura rdzenia wsadu, Δt - gradient temperatury

Dobór czasu grzania



Zależność czasu nagrzewania od temperatury grzania i średnicy wsadu w piecach a) elektrycznym, b) gazowym muflowym, c) elektrodogowym solnym, d) elektrycznym wgłębnym o wymuszonym obiegu powietrza (według O. Pattermana)

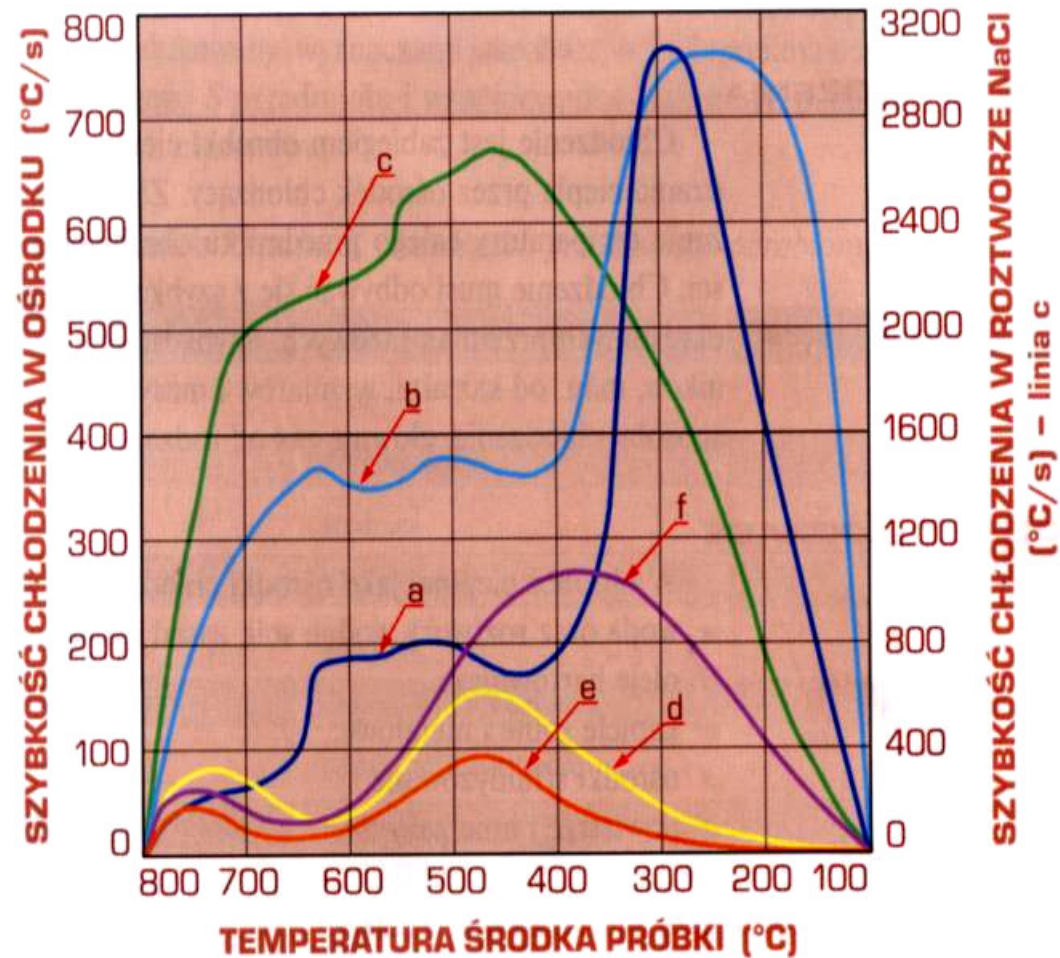
Rodzaje ośrodków grzejnych

- Powietrze
- Ośrodki gazowe
- Złoża fluidalne (*zawiesina drobnych cząsteczek ciała stałego w strumieniu gazu lub cieczy poruszających się z dołu do góry*)
- Kąpiele solne: sole chlorkowe hartownicze (*chlorki baru, sodu, wapnia oraz krzemionka lub tlenek aluminium*) lub saletrzankowe (*azotany sodu, potasu, azotyn sodu, chromiany*)
- Ciekłe kąpiele metalowe: bizmut, antymon, cyna i ołów

Chłodzenie i ośrodki chłodzące

- Zabieg obróbki cieplnej polegający na odprowadzeniu ciepła przez ośrodek chłodzący
- Rodzaje ośrodków chłodzących:
 - Woda, roztwory wodne soli, zasad, polimerów
 - Oleje hartownicze
 - Kąpiele solne i metalowe
 - Ośrodki sfluidyzowane
 - Powietrze i inne gazy

Zdolność chłodząca różnych ośrodków



Rysunek 4.74

Zdolność chłodząca: a) wody spokojnej, b) wody z cyrkulacją, c) 15% wodnego roztworu NaCl, d) oleju hartowniczego OH-70 świeżego, e) oleju hartowniczego OH-70 eksploatowanego przez 7 miesięcy, f) emulsji wodno-olejowej zawierającej 10% oleju

Wyżarzanie

Polega na nagrzaniu stali do określonej temperatury, wygrzaniu i studzeniu w celu uzyskania struktury zbliżonej do stanu równowagi

Klasyfikacja operacji wyżarzania:

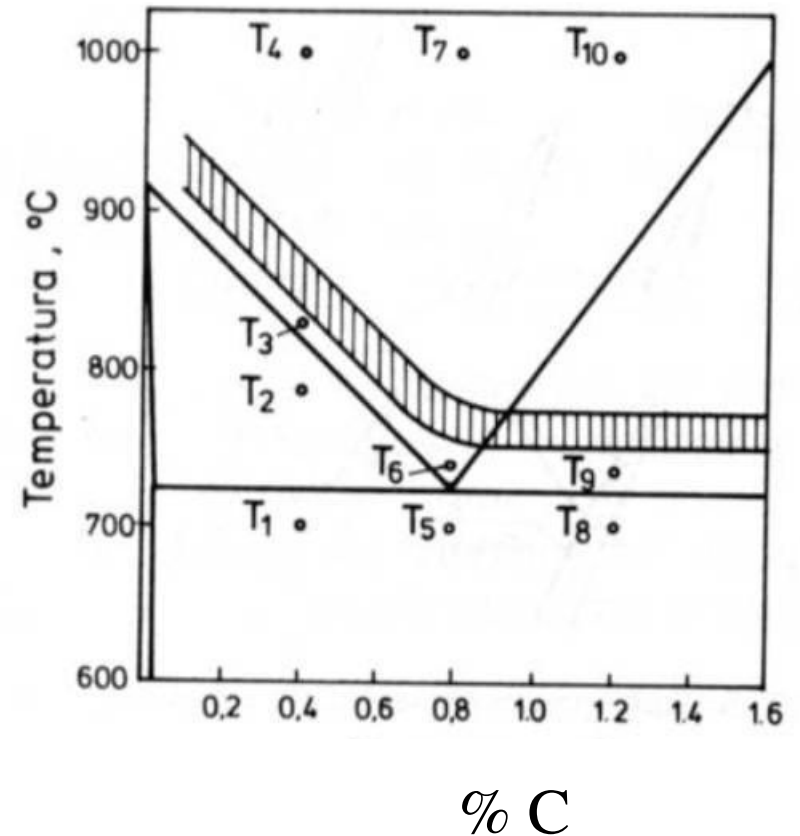
- Przemiany alotropowe nie decydują o istocie procesu (wyżarzanie ujednorodniające)
- Brak przemian alotropowych (wyżarzanie rekrytalizujące i odprężające)
- Przemiany alotropowe decydują o istocie procesu (wyżarzanie normalizujące, zupełne, izotermiczne, sferoidyzujące)

Hartowanie objętościowe

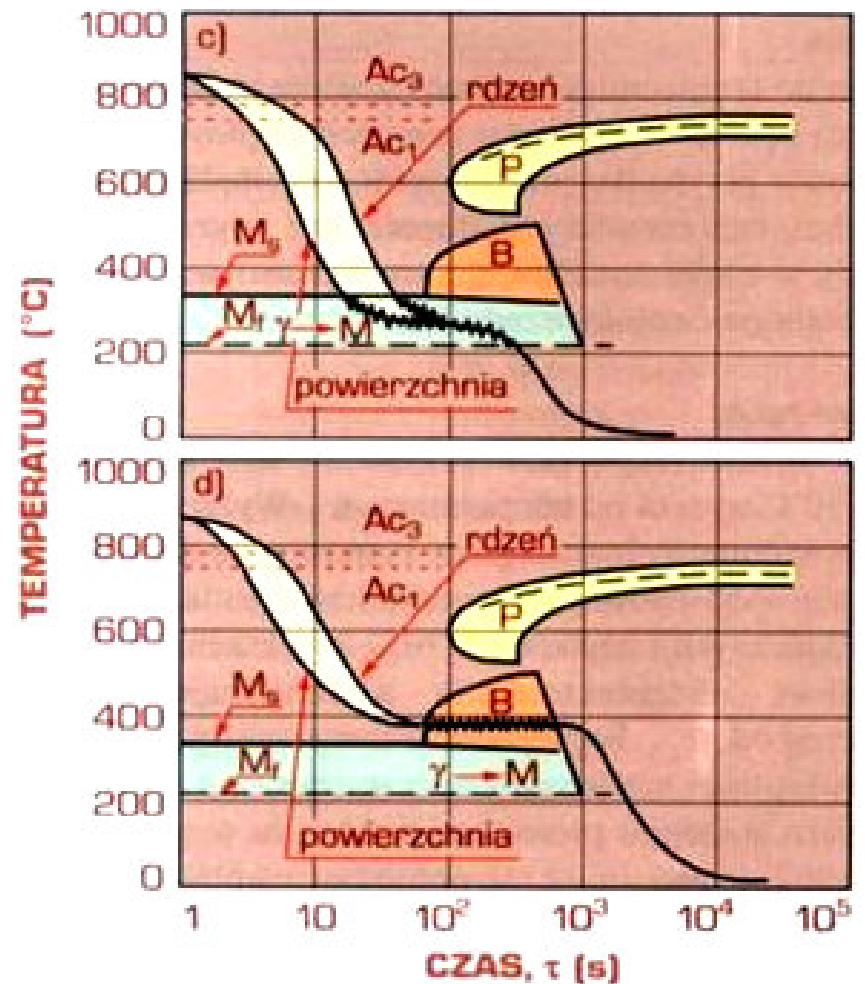
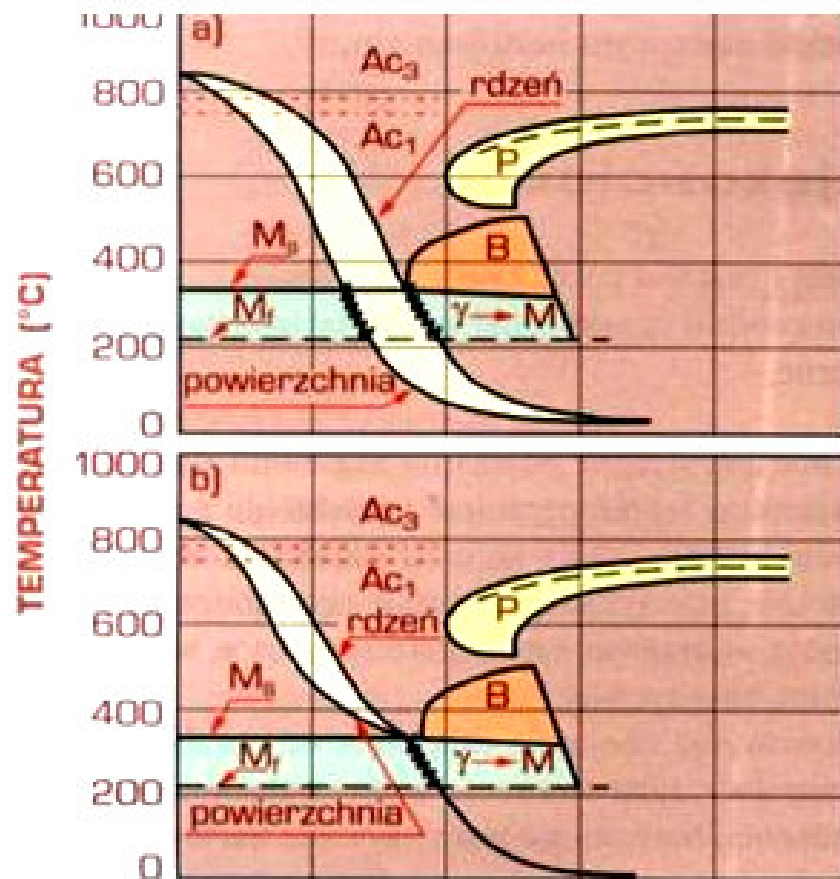
Hartowanie polega na nagrzaniu stali do temperatur występowania austenitu $>A_{c1,3}$, wygrzaniu i oziębieniu z szybkością większą od krytycznej

Hartowanie objętościowe – austenitizacja obejmuje całą objętość przedmiotu

Hartowanie martenzytyczne (zwykle z chłodzeniem ciągłym i stopniowe) oraz bainityczne (zwykle i izotermiczne)



Pasmo prawidłowych temperatur hartowania i nieprawidłowe temperatury T_1 - T_{10}



Krzywe oziębiania podczas hartowania objętościowego stali 41Cr4 na tle wykresów CTP

- a) hartowanie martenzytyczne zwykłe, b i c) hartowanie martenzytyczne stopniowe, d) hartowanie bainityczne z przemianą izotermiczną (według W. Lutego)
 γ – austenit, P – perlit, B – bainit, M – martenzyt

Martenzytyczne zwykłe:

- Chłodzenie ciągle do temperatury niższej niż M_s , stale węglowe zwykle w wodzie, stopowe – w oleju lub na powietrzu
- Struktura martenzyt + austenit szczątkowy + (węgliki)
- Duża twardość i wysokie pozostałe właściwości wytrzymałościowe, niskie właściwości plastyczne, duża kruchość, duże naprężenia i odkształcenia

Martenzytyczne stopniowe

- Oziębienie stopniowe
- Struktura i właściwości j.w., ale mniejsze naprężenia i odkształcenia
- Stosowane do małych przedmiotów i o złożonych kształtach

Bainityczne zwykłe

- Szybkość mniejsza od krytycznej
- Większe właściwości plastyczne i mniejsza kruchość niż przy hartowaniu martenzytycznym

Bainityczne z przemianą izotermiczną

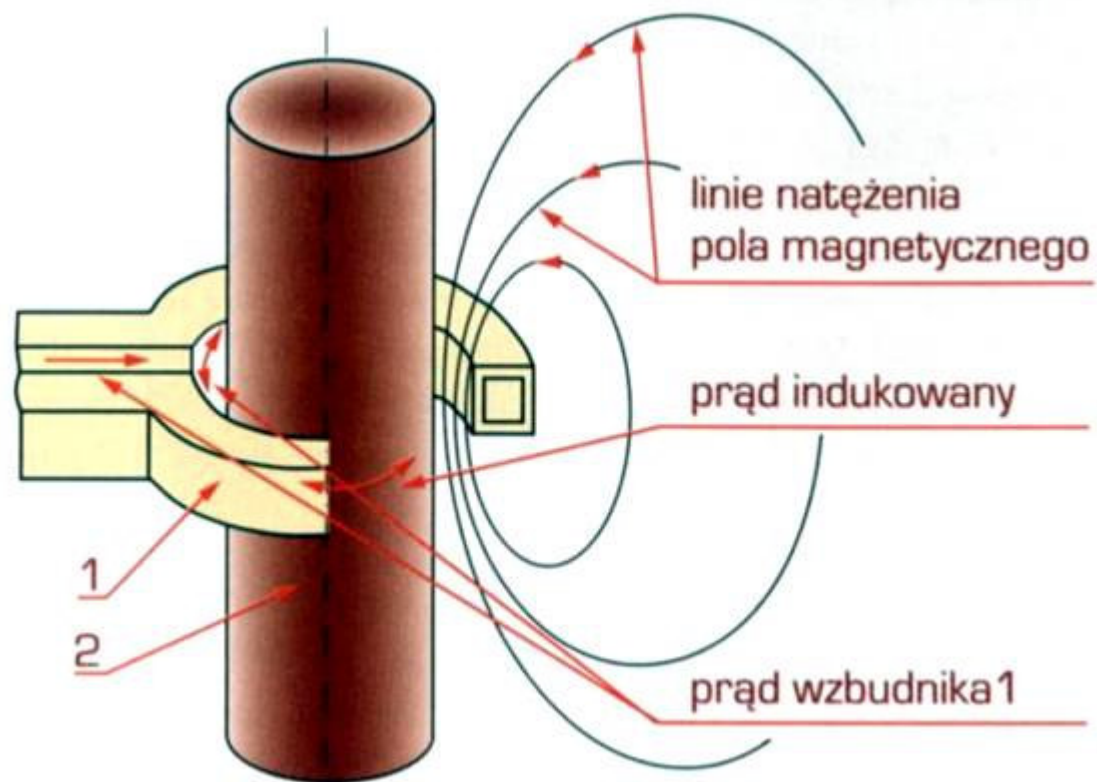
- Oziębienie austenitu przechłodzonego do temperatury niższej od przemiany perlitycznej, wytrzymaniu w tej temperaturze do zakończenia przemiany bainitycznej, chłodzeniu do temperatury pokojowej
- Znaczne ograniczenie naprężeń i odkształceń
- Stosowane do przedmiotów o małych przekrojach i dużych przedmiotów ze stali stopowych

Hartowanie powierzchniowe

Polega na nagrzaniu warstwy wierzchniej przedmiotu do temperatury hartowania i następnym szybkim chłodzeniu

W zależności od sposobu nagrzewania wyróżnia się hartowanie:

- Indukcyjne
- Płomieniowe
- Laserowe
- Kąpielowe
- Kontaktowe (*powierzchnia przedmiotu nagrzewa się w miejscu styku elektrody w postaci rolki dociskowej z powierzchnią przedmiotu*)
- Elektrolityczne
- Impulsowe



Odpuszczanie

Stosowane **zawsze** po hartowaniu

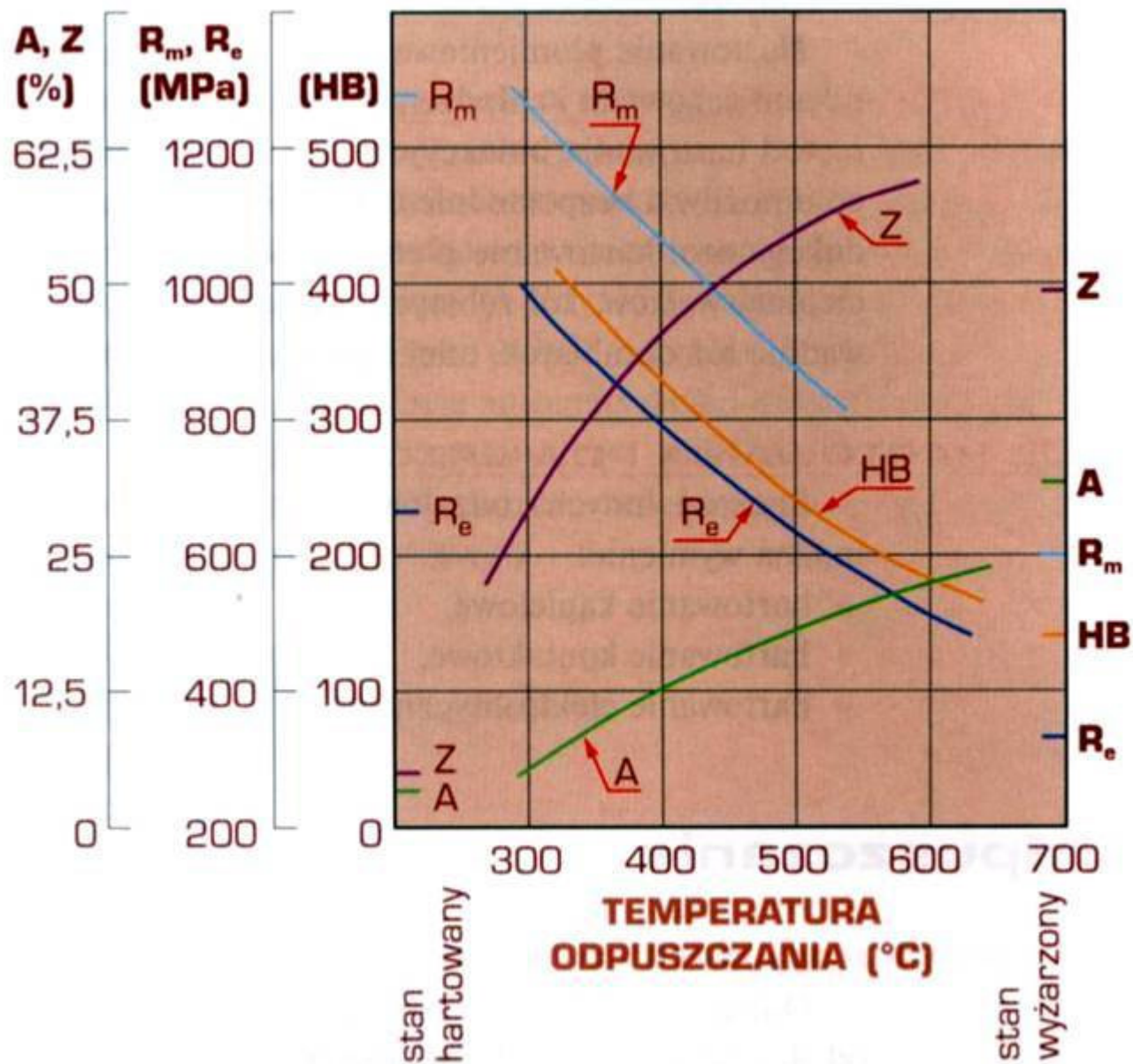
Polega na nagrzaniu stali zahartowanej do temperatury niższej od A_{c1} , wygrzaniu w tej temperaturze i chłodzeniu do temperatury pokojowej

Rodzaje odpuszczania:

- Niskie: 150-200°C do narzędzi, sprężyn, sprawdzianów w celu usunięcia naprężeń hartowniczych z zachowaniem dużej twardości, wytrzymałości i odporności na ścieranie. Hartowanie i niskie odpuszczanie – utwardzanie cieplne
- Średnie: 250-500°C do sprężyn, resorów, matryc, prowadzi do niewielkiego spadku twardości przy zachowaniu dużej wytrzymałości i sprężystości
- Wysokie: 500°C- A_{c1} , ma na celu osiągnięcie optymalnych właściwości wytrzymałościowych i plastycznych, stosowane do elementów konstrukcji, od których wymaga się wysokiej granicy plastyczności. Hartowanie i wysokie odpuszczanie – ulepszanie cieplne. Miara skuteczności ulepszania cieplnego – stosunek R_e/R_m .

Struktury stali odpuszczonych

- Niskie: martenzyt niskoodpuszczony – mieszanina martenzytu tetragonalnego z dyspersyjnymi węglkami ϵ i austenitem szcążkowym
- Średnie: martenzyt średniodopuszczony, małe odkształcenie tetragonalne i dyspersyjne wydzielania cementytu
- Wysokie: martenzyt wysokoodpuszczony, nieprzesycony węglem, mała gęstość dyslokacji, skoagulowane wydzielania cementytu, brak austenitu szcążkowego, w stalach stopowych węgliki stopowe

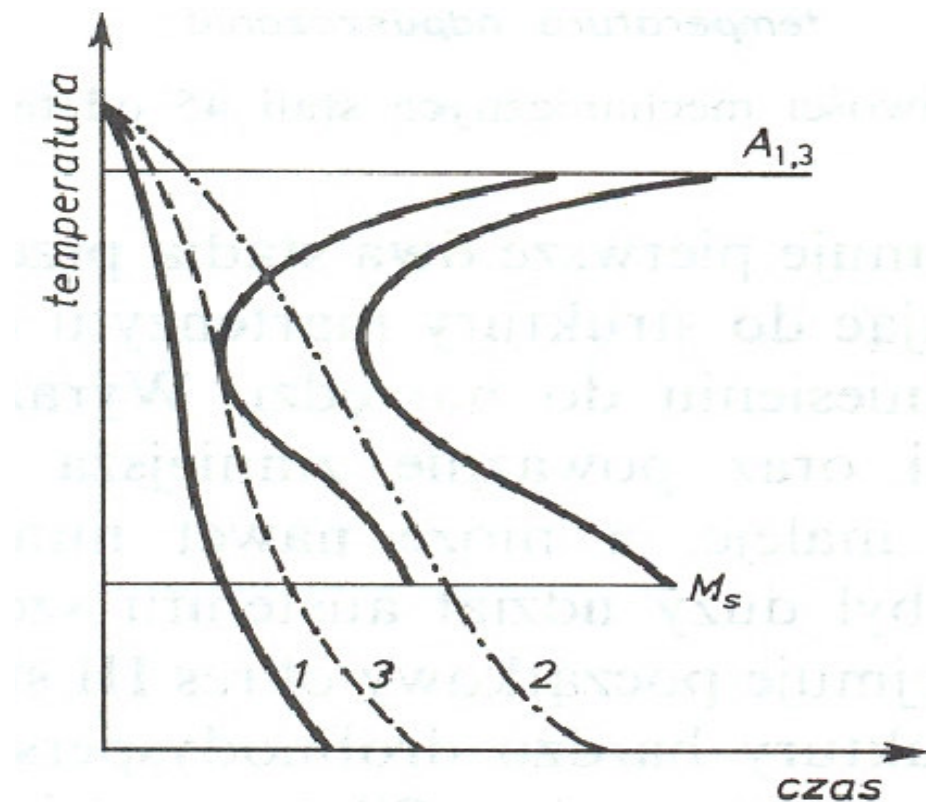


Obróbka podzerowa

- Inaczej wymrażanie: chłodzenie stali bezpośrednio po hartowaniu do temperatury poniżej 0°C, wychłodzenie i ogrzanie do temperatury pokojowej
- Cel - zmniejszenie ilości austenitu szczątkowego
- Stosowane dla narzędzi pomiarowych i sprawdzianów w celu stabilizacji struktury, a tym samym wymiarów elementów

HARTOWNOŚĆ

Stale niestopowe można hartować tylko w wypadku małych przekrojów, ponieważ w większych przekrojach uzyskuje się strukturę martenzytyczną jedynie w warstwach wierzchnich, których granicę stanowią obszary przekroju chłodzone z szybkością równą krytycznej szybkości chłodzenia. Bliżej środka pręta wystąpią struktury niemartenzytyczne, jak bainit, perlit, ferryt.



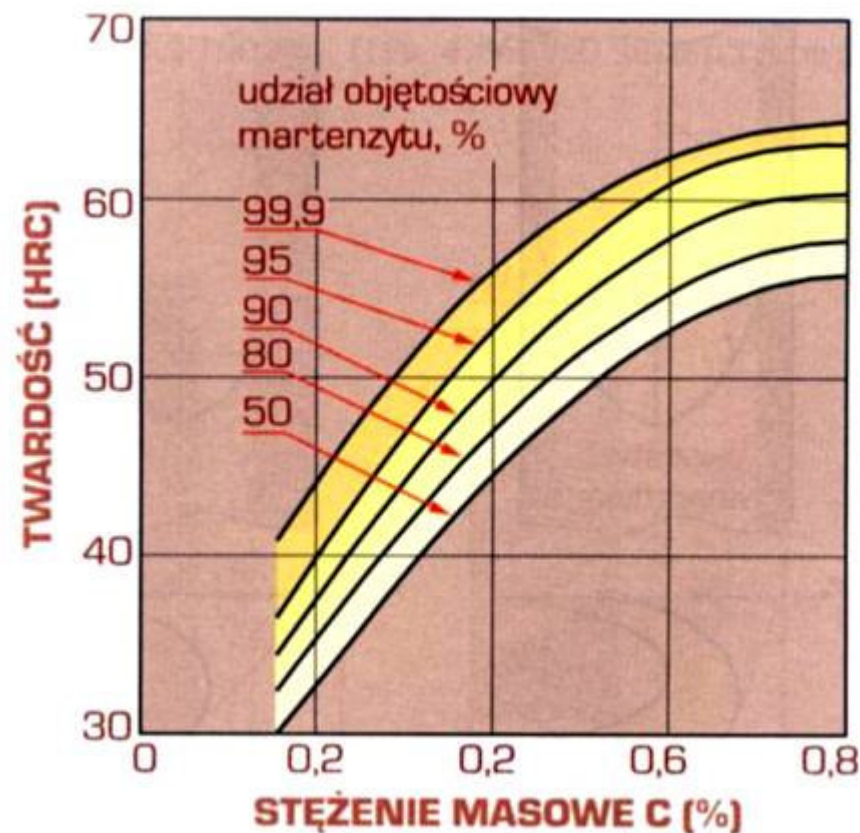
Szybkość chłodzenia: 1 – na powierzchni, 2 – w osi przekroju, 3 – krytyczna szybkość chłodzenia

Hartowność – cecha stali określająca zdolność do hartowania się w głąb na strukturę martenzytyczną.

Czynniki wpływające na hartowność:

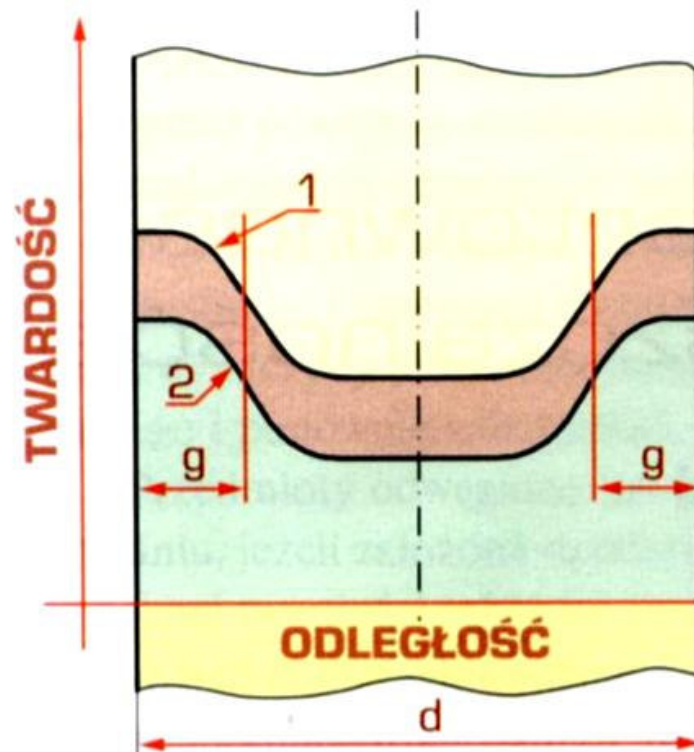
- skład chemiczny stali; stale niestopowe mają niską hartowność. Hartowność zwiększa węgiel↑ i dodatki stopowe↑ (oprócz kobaltu ↓) rozpuszczone w austenicie,
- wielkość ziarna austenitu; stale gruboziarniste↑ mają większą hartowność,
- jednorodność austenitu; bardziej jednorodny ↑ austenit zwiększa hartowność,
- nierozpuszczone ↓ cząstki węglików, tlenków, azotków – zmniejszają hartowność.

Utwardzalność: podatność stali na hartowanie, której miarą jest zależność największej możliwej do uzyskania po hartowaniu twardości od warunków austenityzowania i szybkości chłodzenia



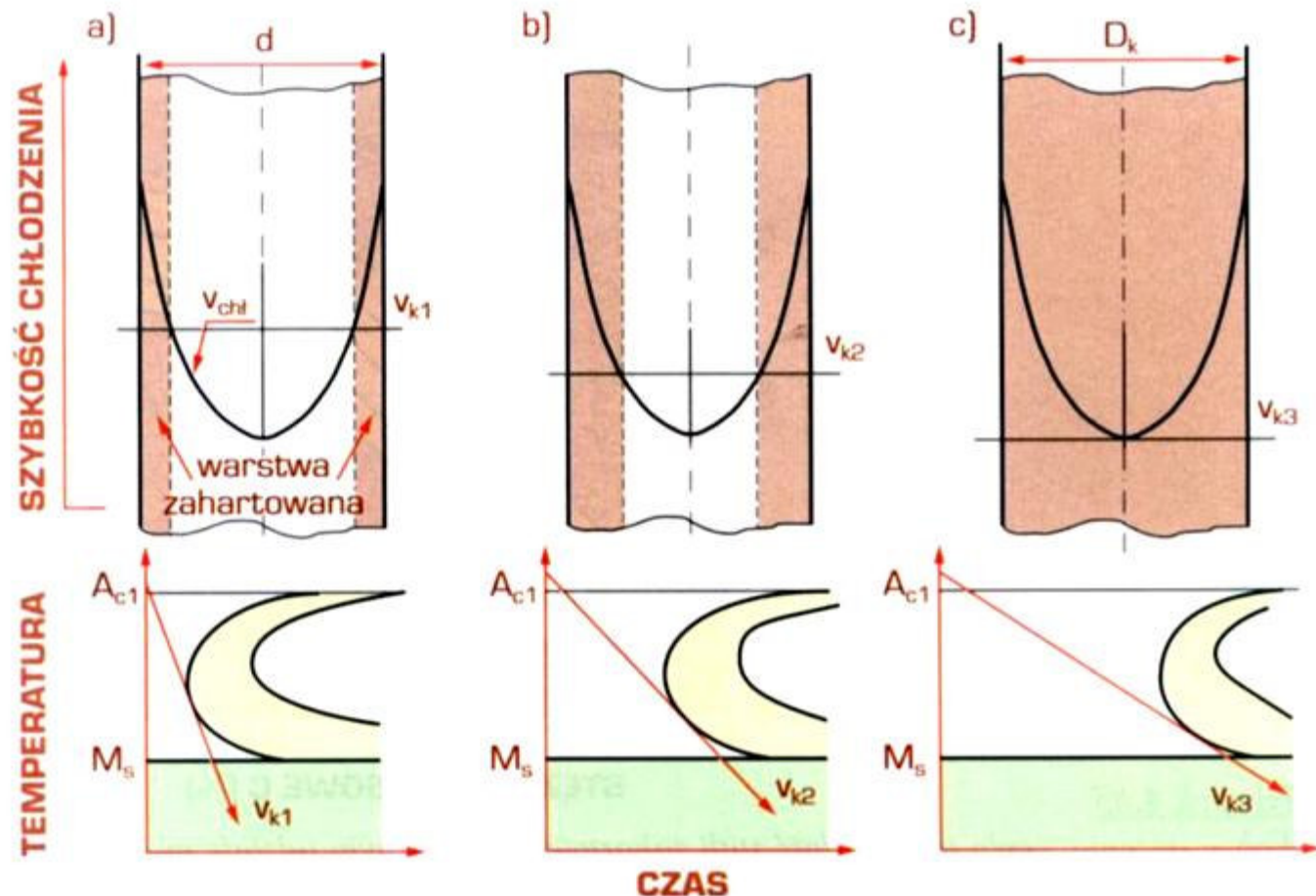
Przechartowalność: podatność stali na hartowanie jako zależność przyrostu twardości od szybkości chłodzenia

Schemat rozkładu twardości na przekroju prętów o jednakowej średnicy z dwóch stali o tej samej przechartowalności, lecz różnej utwardzalności, 1 - stal węglowa o stężeniu C większym niż w stali 2, 2 - stal niskostopowa



Średnica krytyczna – miara przehartowalności: średnica pręta, w którym po zahartowaniu w ośrodku o określonej intensywności chłodzenia w osi przekroju poprzecznego uzyskuje się strukturę złożoną z $n\%$ martenzytu. Średnica D_{50} nazywa się średnica półmartenzytyczną

Schemat zależności grubości warstwy zahartowanej w pręcie o średnicy d od krytycznej szybkości chłodzenia różnych stali o hartowności:
a) małej, b) średniej, c) dużej

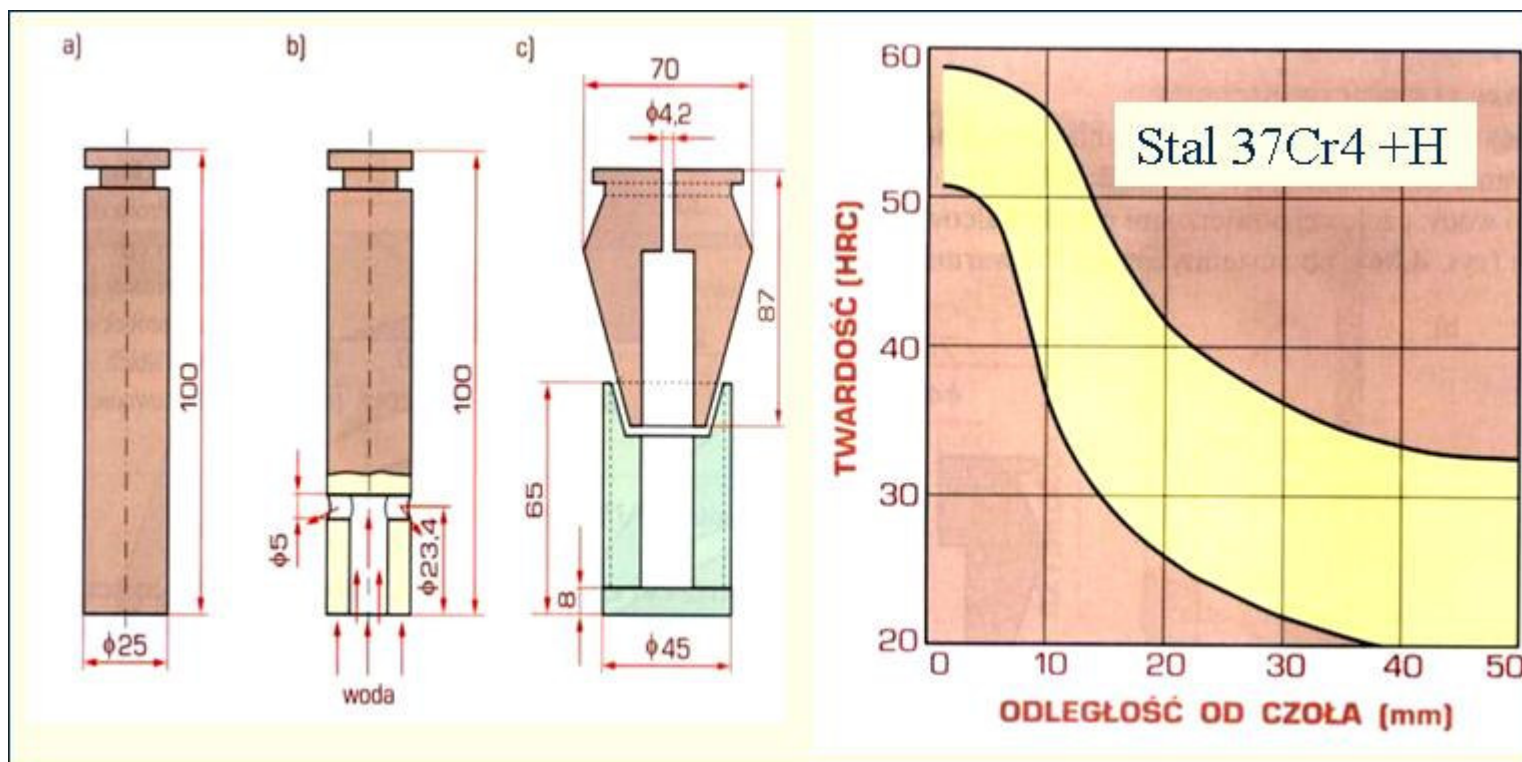


Wartość średnicy krytycznej dla danej stali zależy od zdolności chłodzącego ośrodka do odprowadzania ciepła, której miarą jest współczynnik intensywności chłodzenia H

Orientacyjne wartości współczynnika intensywności chłodzenia H dla różnych ośrodków chłodzących

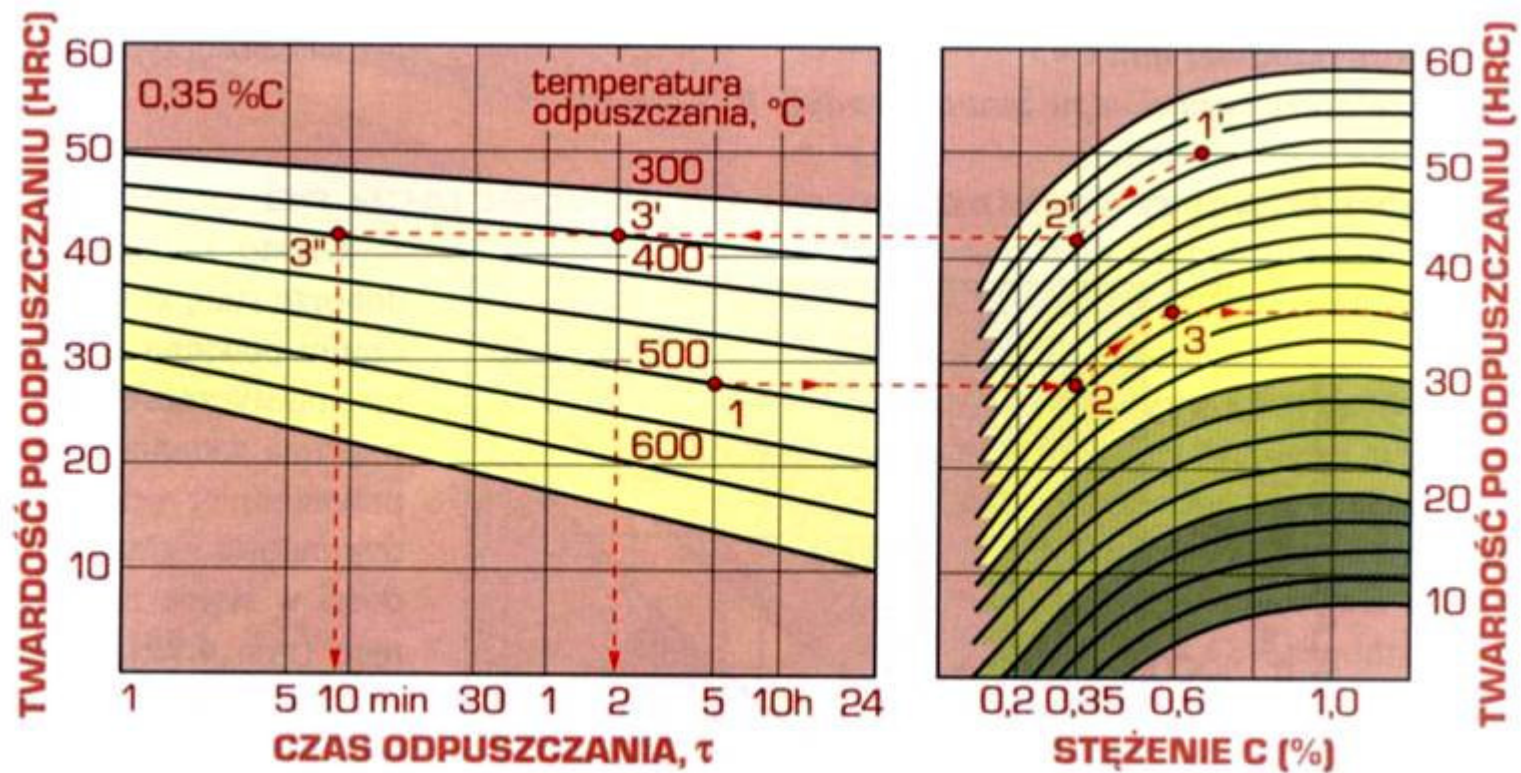
Ruch ośrodka względem przedmiotu	Wartość współczynnika H dla:			
	wodnego roztworu NaCl	wody	oleju	powietrza
Żaden	2	1	0,3	0,02
Mały	2,2	1,3	0,4	
Średni		1,5	0,5	
Silny	5	2	0,8	0,05
Gwałtowny	7,5	4	1,1	
Natrysk		10	1,5	

Metoda Jominy`ego określania hartowności



Odpuszczalność

- Odpuszczalność – reakcja stali po hartowaniu na odpuszczanie
- Określona zależnością twardości od temperatury odpuszczania przy stałym czasie lub temperaturze
- Zależy od struktury stali po hartowaniu



Obróbka cieplno-chemiczna

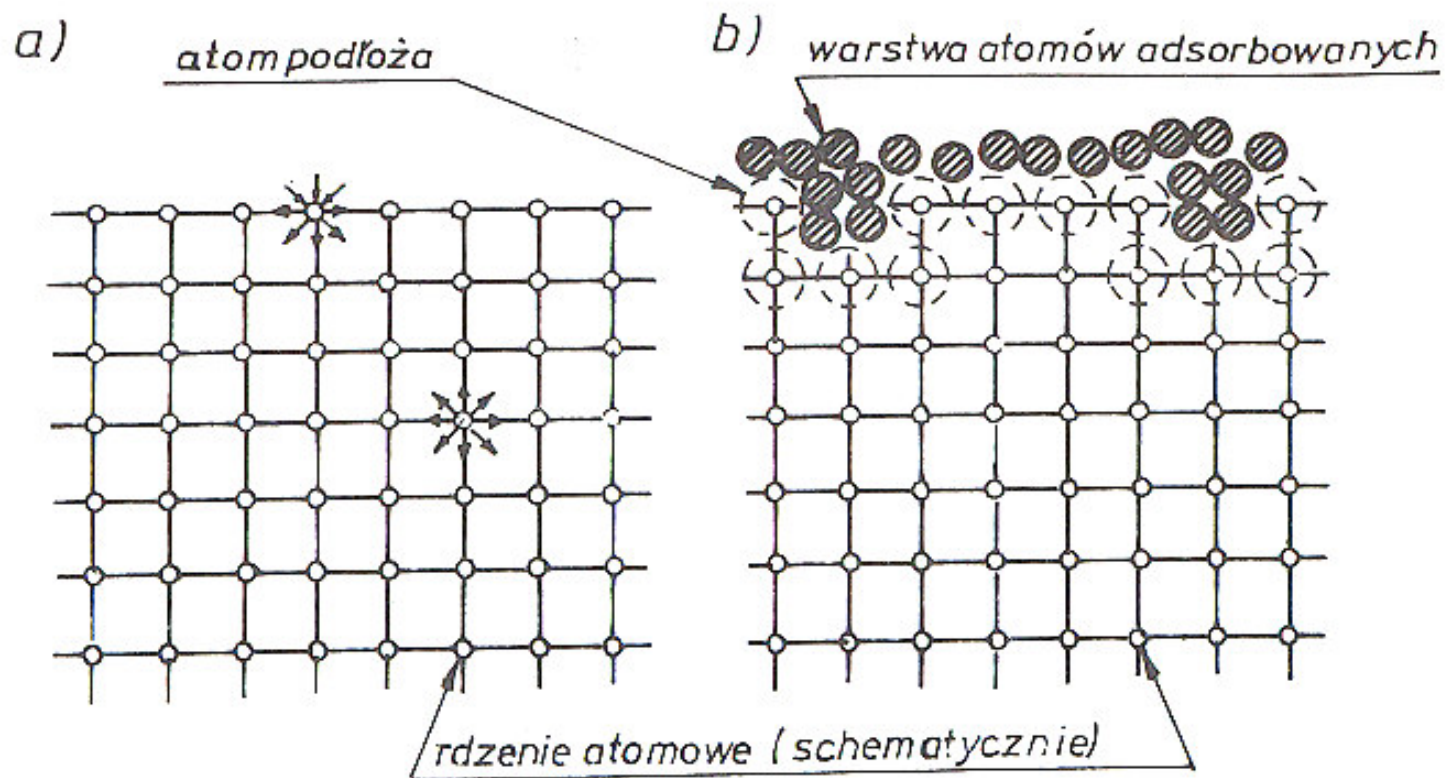
1. Podstawy teoretyczne
2. Dyfuzyjne nasycanie stali węglem i azotem

Postawy teoretyczne

- Definicja: zabieg cieplny lub zespół zabiegów prowadzonych dla uzyskania zmiany składu chemicznego i struktury, a przez to właściwości warstwy wierzchniej stopu w wyniku oddziaływania chemicznego środowiska i temperatury. Oprócz przekazywania ciepła, ma miejsce **transport masy**
- Cel obróbki: wytworzenie warstw wierzchnich o zwiększonej odporności na ścieranie, zmęczenie, korozyjne działanie środowiska
- Najczęściej stosowane zabiegi obróbki cieplno-chemicznej: nawęglanie, azotowanie, węgloazotowanie i azotonawęglanie, krzemowanie, metalizowanie dyfuzyjne (aluminowanie, chromowanie, cynkowanie itp.)

Procesy składowe transportu masy w obróbce cieplno-chemicznej:

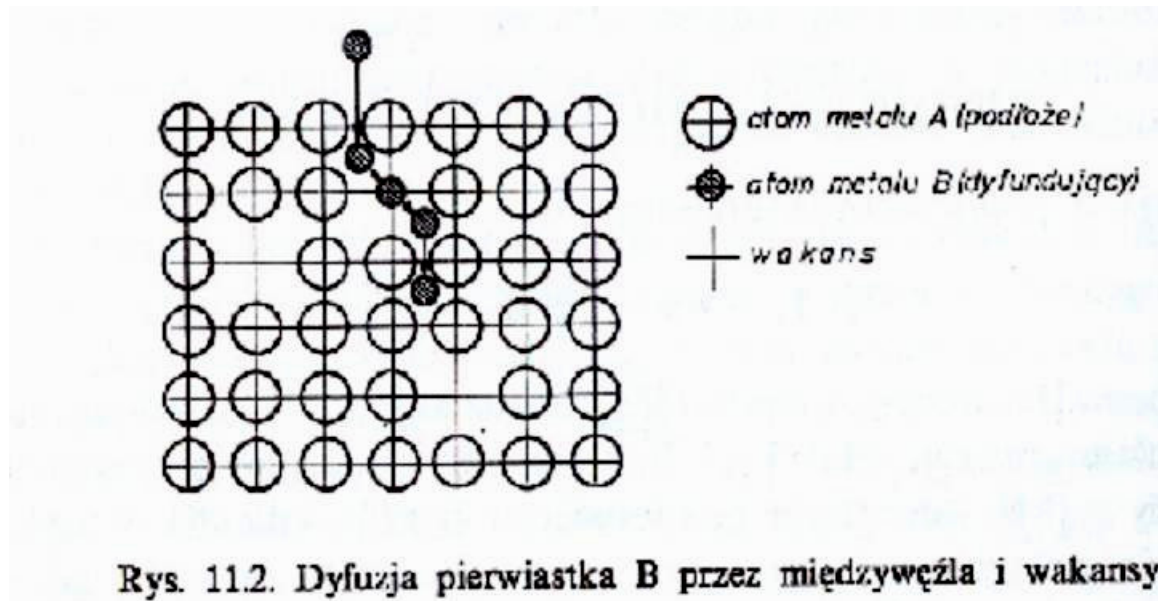
1. Reakcje w ośrodku nasycającym, związane z utworzeniem aktywnych wolnych atomów składnika nasycającego, np. $\text{CH}_4 \Leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$
2. Dyfuzja w ośrodku nasycającym, m.in. dopływ atomów składnika nasycającego do powierzchni metalu
3. Adsorpcja, czyli osadzanie wolnych atomów składnika nasycającego na granicy fazy stałej w postaci warstewki o grubości zbliżonej do średnicy jednego atomu
4. Dyfuzja, aktywowany cieplnie proces zachodzący wskutek ruchu atomów w sieci przestrzennej metalu w kierunku wyrównania stężenia składników. Warunkiem przebiegu dyfuzji jest rozpuszczalność w stanie stałym pierwiastka nasycającego w osnowie metalicznej obrabianego materiału. Dyfuzję opisują prawa Ficka.



Adsorpcja: a) schemat sił powierzchniowych powodujących adsorpcję atomów, b) warstwa atomów adsorbowanych

Mechanizmy dyfuzji:

- W roztworach różnowęzłowych – mechanizm wakansowy
- W roztworach międzywęzłowych – mechanizm międzywęzłowy, charakterystyczny dla C i N w stopach żelaza



Prawa Ficka opisujące dyfuzję

Pierwsze prawo Ficka stwierdza że:

strumień cząstek dyfuzji jest proporcjonalny do gradientu stężenia

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

gdzie:

J - strumień składnika (masa molowa składnika przepływająca przez jednostkowy przekrój w jednostce czasu- ilość atomów składnika nasycającego na jednostkę powierzchni i w jednostce czasu),

D - ***współczynnik dyfuzji***,

c - stężenie (ilość substancji) na jednostkę objętości,

x - współrzędna osi, wzdłuż której zachodzi dyfuzja.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

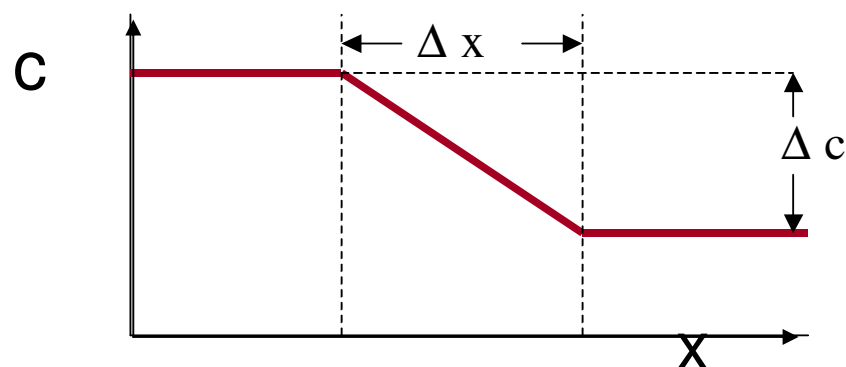
D – współczynnik dyfuzji [cm^2/s],

Q – energia aktywacji dyfuzji,

R – stała gazowa $8,314[\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}]$ (stała fizyczna równa pracy wykonanej przez 1 mol gazu doskonałego podgrzewanego o 1 kelwin podczas przemiany izobarycznej),

D_0 – stała zależna od struktury krystalicznej metalu, [

T – temperatura w skali bezwzględnej



Np. Współczynnik dyfuzji węgla w stali z 0,2 % C w 1100°C
 $= 6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$

c – stężenie [$1/\text{cm}^3$],

x – odległość [cm],

Drugie prawo Ficka opisuje zależność rozkładu stężenia dyfundującego pierwiastka od czasu:

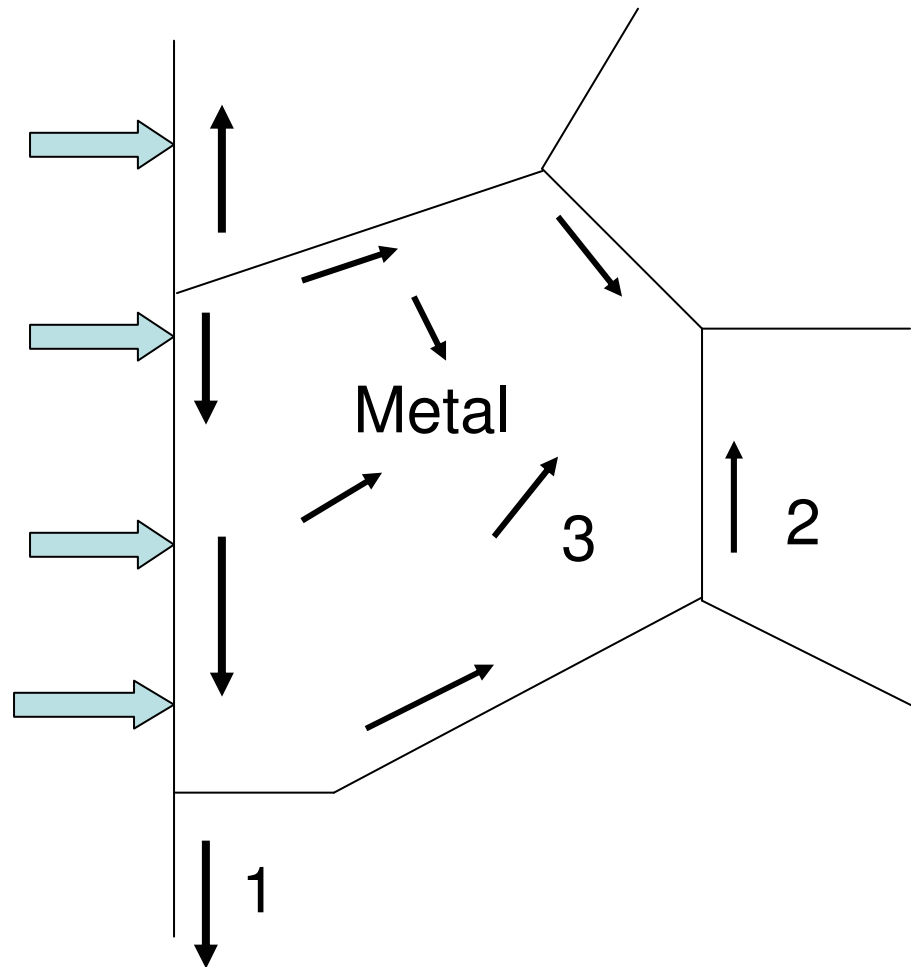
$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left[D \frac{dc}{dx} \right]$$

służy do wyznaczania stężenia (c) dyfundującego pierwiastka w odległości (x) od powierzchni w określonym czasie (t), gdy znany jest współczynnik D_0 oraz rozkład stężenia tych atomów w chwili początkowej $t=0$.

Drogi dyfuzji:

1. Wzdłuż powierzchni – najłatwiej
2. Wzdłuż granic ziaren – trudniej
3. Wewnątrz ziaren – najtrudniej

Pierwiastek
dyfundujący



Dyfuzyjne nasycanie stali węglem i azotem

Nawęglanie polega na dyfuzyjnym nasycaniu warstwy wierzchniej stali (zwykle 0,5-2 mm) w węgiel podczas wygrzewania obrabianego przedmiotu w ciągu określonego czasu w ośrodku zawierającym węgiel atomowy w temperaturze 900-950°C

Ośrodki nawęglające, m.in.: stałe (węgiel drzewny), roztopione sole (węglany, chlorki metali alkalicznych), gazowe (CO, CH₄)

Stale do nawęglania – niskowęglowe, do ok. 0,25%C

Zawartość węgla w stali po nawęglaniu: ~0,8 % w strefie przypowierzchniowej, malejąca w kierunku rdzenia

Struktura i twardość stali po nawęglaniu: perlityczna (lub z małym udziałem Fe₃C) w strefie przypowierzchniowej o twardości 250-300 HB, do ferrytyczno-perlitycznej w rdzeniu o twardości 100-150 HB

Obróbka cieplna **po nawęglaniu**: hartowanie w celu zwiększenia twardości warstwy przypowierzchniowej do 60 HRC i niskie odpuszczanie

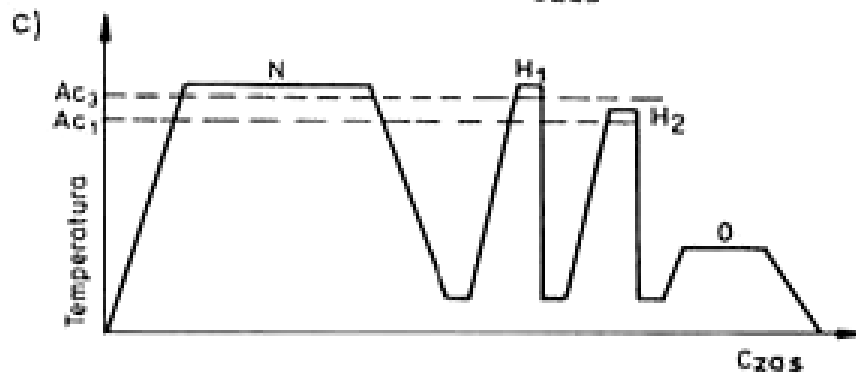
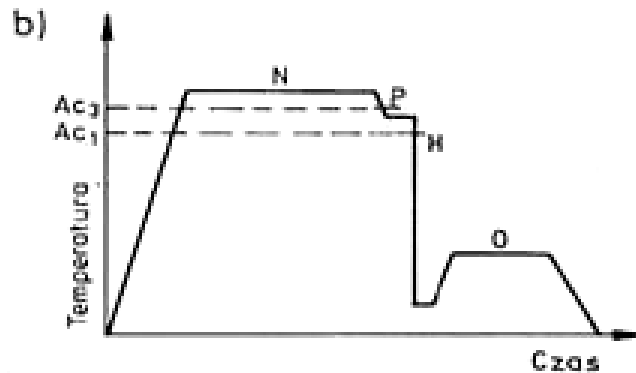
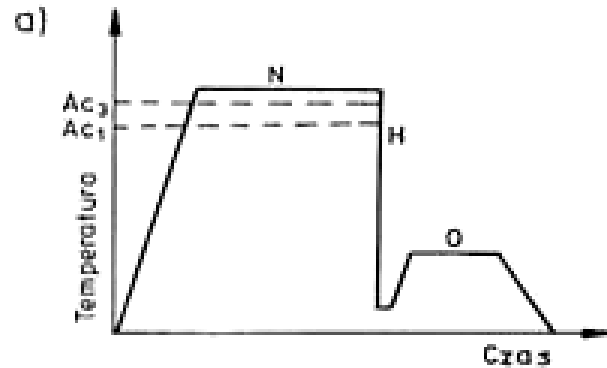
Zastosowanie nawęglania: elementy o dużej twardości powierzchni, odporności na ścieranie, naciski powierzchniowe i wytrzymałości zmęczeniowej z rdzeniem o dużej ciągliwości, sprężystości i odporności na dynamiczne obciążenia, takie jak koła zębate, wałki rozrządu, sworznie tłokowe, pierścienie i wałki łożysk tocznych

N – nawęglanie

H – hartowanie,

P – podchładzanie

O – odpuszczanie niskie



Schematy obróbki cieplnej stali
po nawęglaniu:

a) – hartowanie bezpośrednie,

b) – hartowanie z
podchładzaniem,

c) – hartowanie dwukrotne

Azotowanie polega na dyfuzyjnym nasycaniu warstwy wierzchniej stali (do ok. 0,4 mm) w azot podczas wygrzewania obrabianego przedmiotu w ciągu określonego czasu w ośrodku zawierającym azot atomowy w temperaturze niższej niż A_{c1}

Obróbka cieplna przed azotowaniem: ulepszanie cieplne

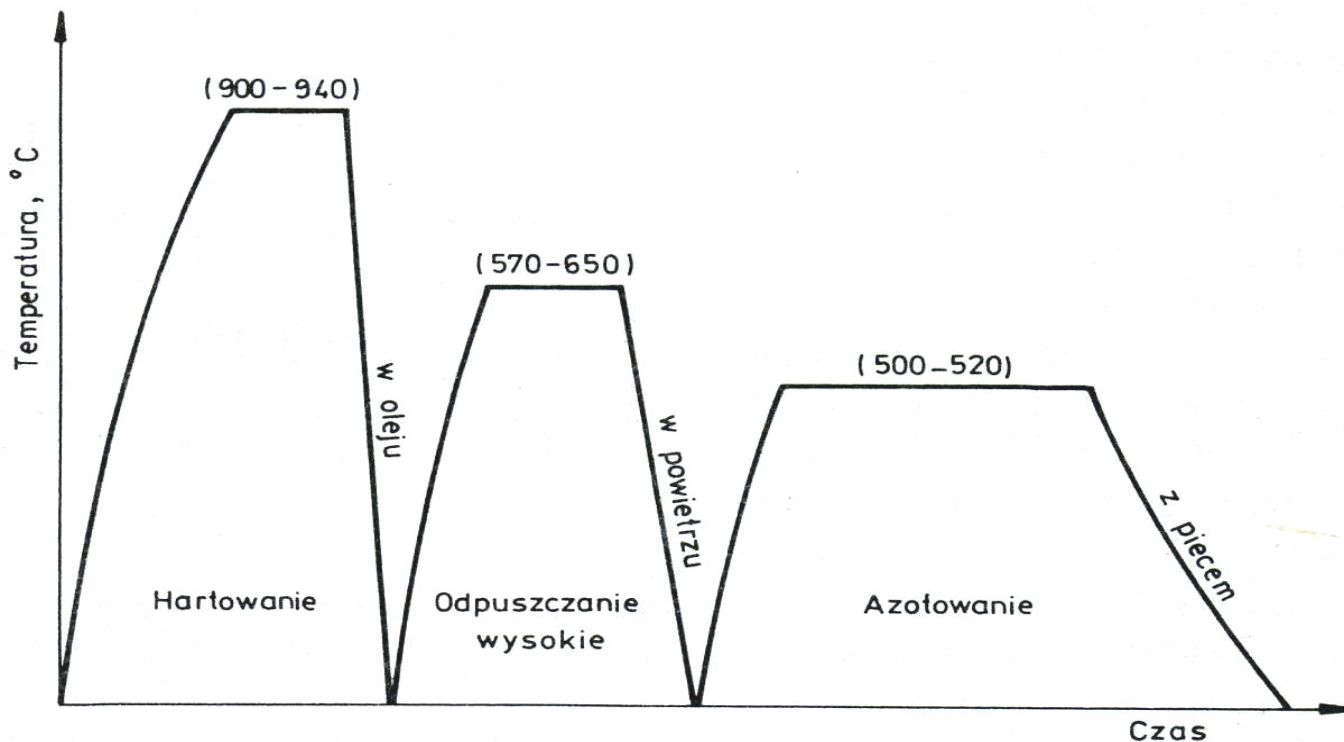
Stale do azotowania – średniowęglowe, ok. 0,4%C, w tym z pierwiastkami stopowymi Cr, Mo, Al, tworzącymi twarde azotki

Ośrodki: najczęściej strumień zdysocjowanego amoniaku w temperaturze 500-600°C, $NH_3 \leftrightarrow 3H + N$

Struktura i właściwości przypowierzchniowej strefy stali po nawęglaniu: azotki o dużym stopniu dyspersji, twardość 800-1200 HV0,05, odporność na korozję

Zastosowanie azotowania: elementy konstrukcyjne i narzędziowe narażone podczas pracy na zużycie ścierne i korozję, np. elementy silników i pomp w przemyśle okrętowym, lotniczym i motoryzacyjnym, narzędzia do obróbki plastycznej i skrawania, elementy wtryszarek i wtryskarek

Obróbka cieplna przed azotowaniem utwardzającym: **ulepszanie cieplne** (hartowanie + odpuszczanie wysokie) w celu uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych w rdzeniu elementu.



Azotowanie utwardzające

- *Ośrodek:* amoniak, temperatura 480-560°C, czas kilkanaście-kilkadziesiąt godzin, stopień dysocjacji amoniaku 20-60%. Reakcja dysocjacji: $2\text{NH}_3 \leftrightarrow 2\text{N}_{\text{at}} + 3\text{H}_2$
- *Sposób wykonania:* piecach ze szczelną retortą o naturalnej lub wymuszonej cyrkulacji atmosfery. Przedmioty do azotowania oczyszczone i odtłuszczone; powierzchnie, które nie podlegają azotowaniu, zabezpieczone pastami lub powłokami
- Grubość warstwy od 0,2-0,8 mm
- Twardość po azotowaniu: stale niestopowe ~ 1100 HV - co wiąże się z wytworzeniem na powierzchni fazy γ' (Fe_4N), a stale stopowe ~ 1500 HV - na skutek utworzenia azotków pierwiastków stopowych o dużym stopniu dyspersji

Azotowanie antykorozyjne

- *Ośrodek*: amoniak, temperatura 600-800°C, czas 1-6 godzin
- *Sposób wykonania*: jak w azotowaniu antykorozyjnym
- Grubość warstwy 0,005-0,03 mm (stale, żeliwa niestopowe)
- Struktura warstwy wierzchniej po azotowaniu: azotek typu $\epsilon = \text{Fe}_2\text{N}$ o dużej odporności korozyjnej

Inne rodzaje obróbki cieplno-chemicznej

- **Aluminiowanie** – odporność korozyjna (pasywacja!)
- **Naborowywanie** - odporność korozyjna, żaroodporność, twardość
- **Chromowanie** - odporności na zużycie, własności termicznych, estetyczne
- **Siarkowanie** - odporności na ścieranie
- **Tytanowanie** - twardość powierzchni, odporność na ścieranie, szczególnie w podwyższonych temperaturach
- **Węgloazotowanie (cyjanowanie)** - skrócenie czasu procesu w stosunku do czasu nawęglania, bardzo twarde powłoki odpornych na ścieranie, stosunkowo niska temperatura procesu.