

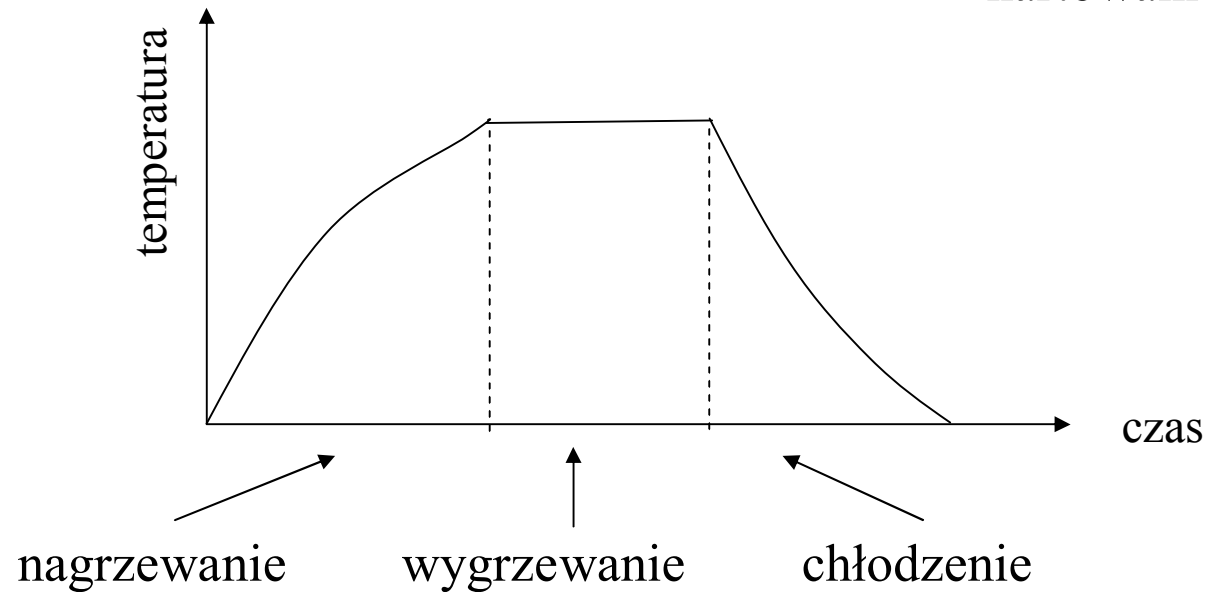
# Obróbka cieplna stali

**Obróbka cieplna stopów:** zabiegi cieplne, które mają na celu nadanie im pożądanych cech mechanicznych, fizycznych lub chemicznych przez zmianę struktury stopu.

Podstawowe etapy obróbki cieplnej:

Najważniejsze rodzaje obróbki cieplnej:

- wyżarzanie,
- hartowanie, odpuszczanie,



## Przemiany fazowe w stali związane z obróbką cieplną

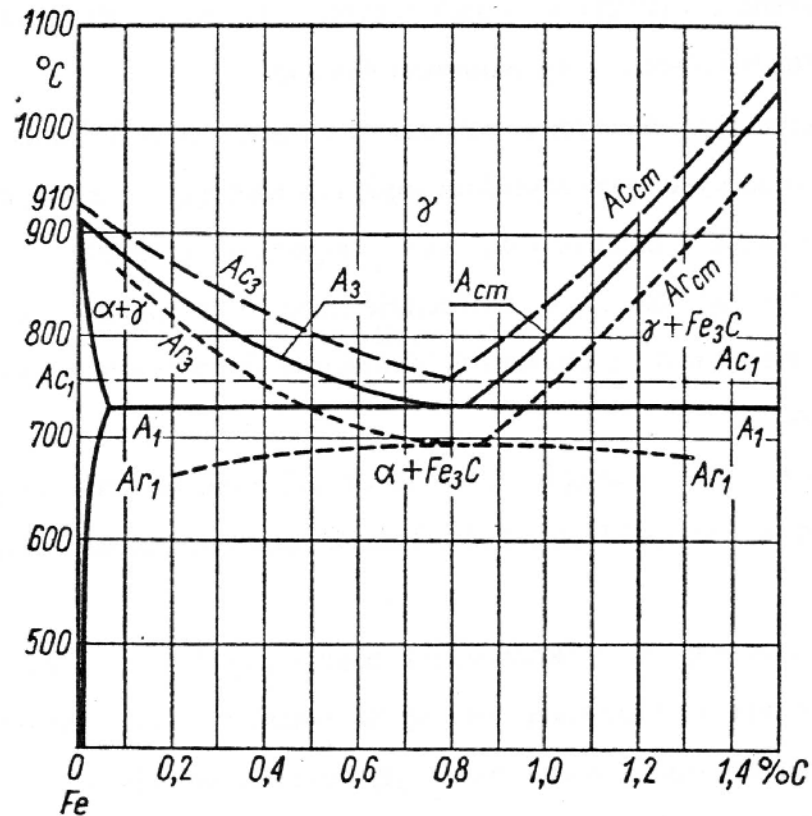
### Przemiany występujące przy nagrzewaniu

przemiany: perlit  $\rightarrow$  austenit

ferryt  $\rightarrow$  austenit

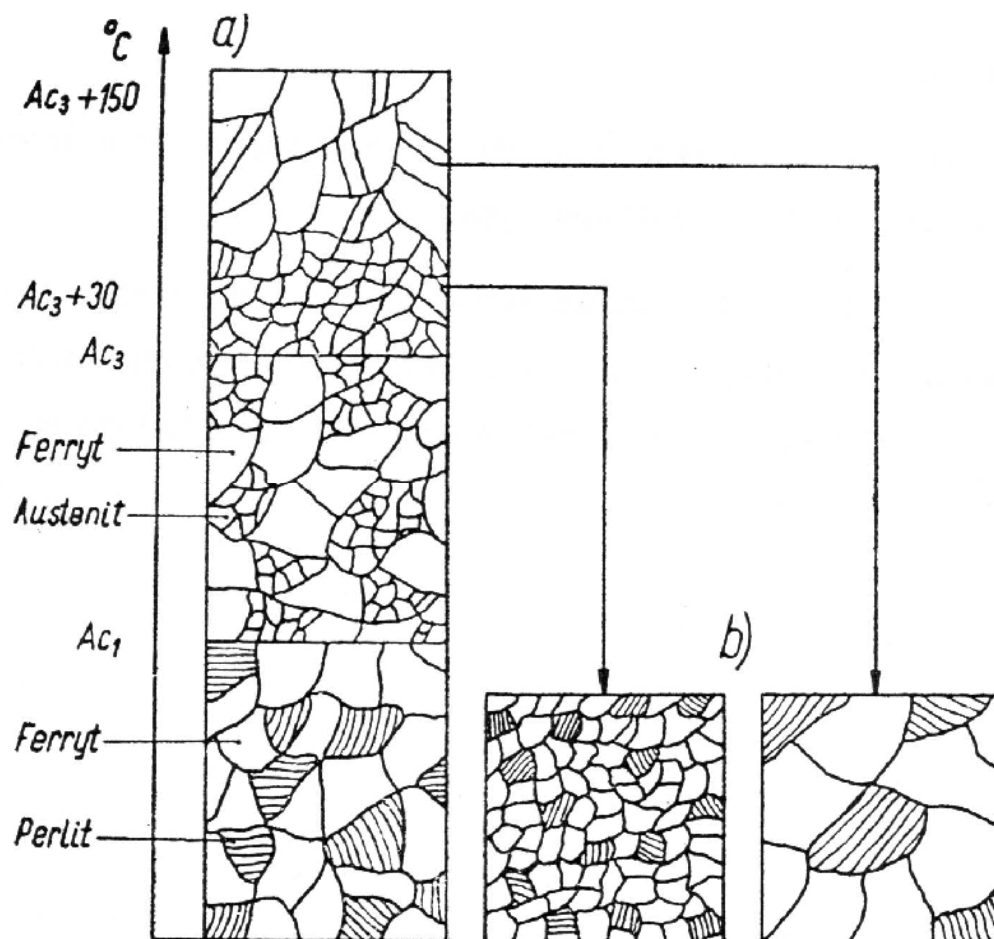
rozpuszczanie cementytu w austenicie

są to przemiany dyfuzyjne, których przebieg zależy nie tylko od temperatury, lecz także od czasu, więc także od szybkości nagrzewania .



# Schemat zmian strukturalnych w stali (0,35%C)

a) przy nagrzewaniu,      b) przy chłodzeniu



Podczas przejścia przez zakres temperatur  $Ac_1$  zawsze następuje rozdrobnienie struktury, gdyż jeden obszar (ziarno) perlitu rozpada się na wiele ziaren austenitu.

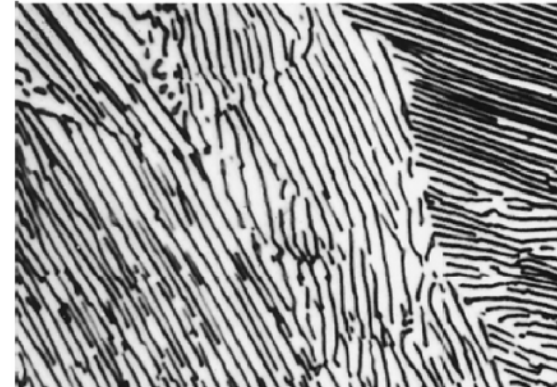
Rozrost ziaren austenitu następuje w wyniku wytrzymania w temperaturze znacznie powyżej  $Ac_3$

## Przemiany zachodzące przy chłodzeniu:

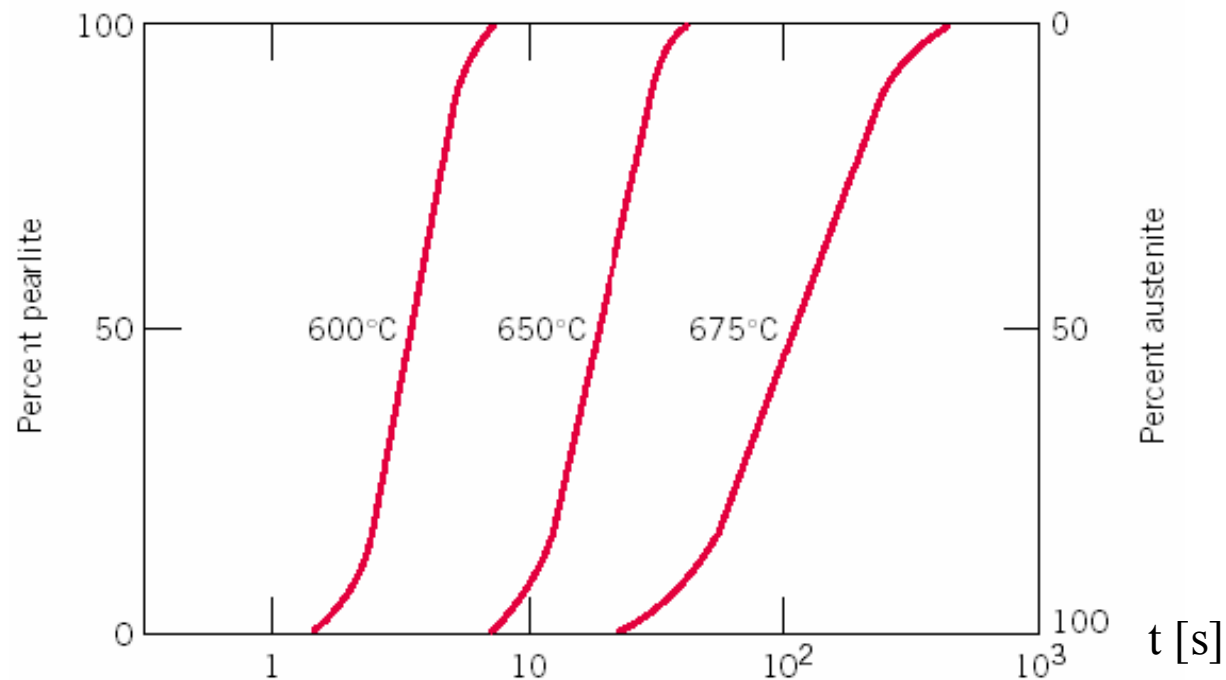
perlityczna, bainityczna, martenzytyczna

Szybkość przemiany austenitu w perlit zależy od temperatury przemiany

drobny  
perlit

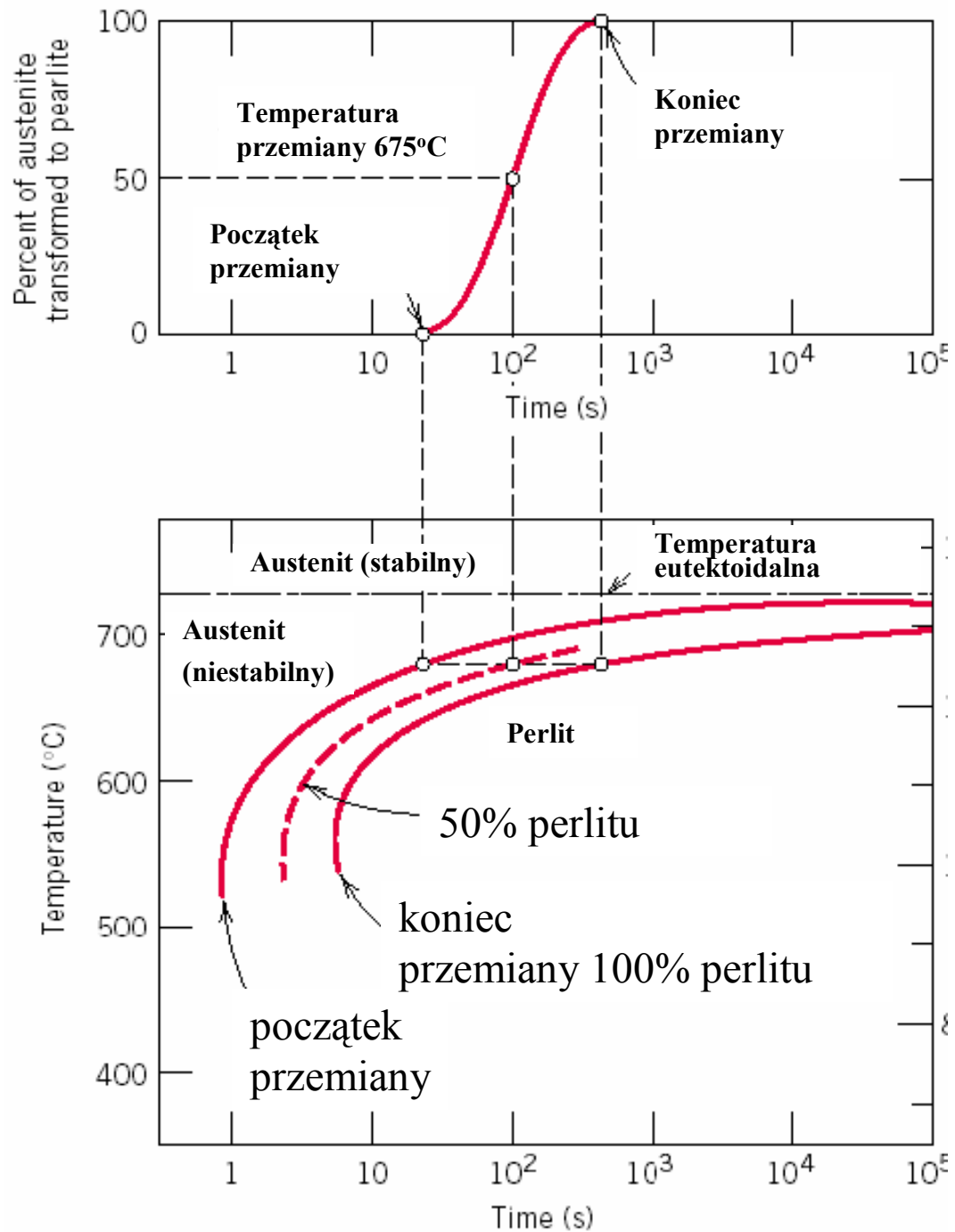


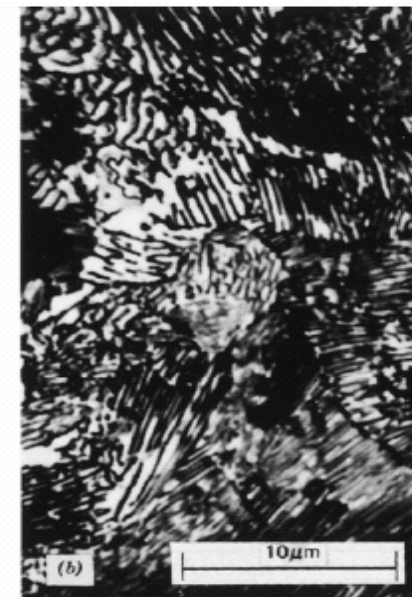
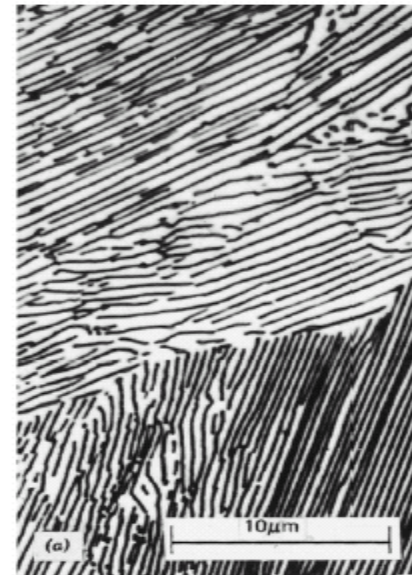
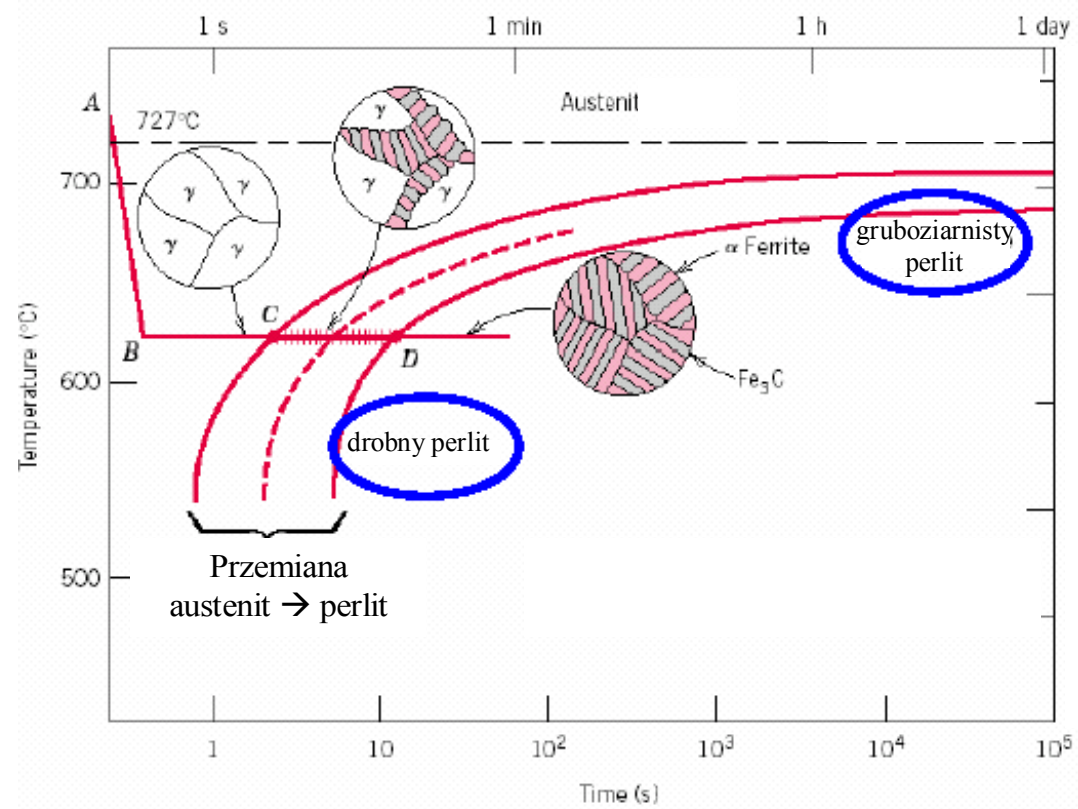
grubopłytkowy  
perlit



Izotermiczna zależność temperaturowa przemiany jako % przemiany względem  $\log t$

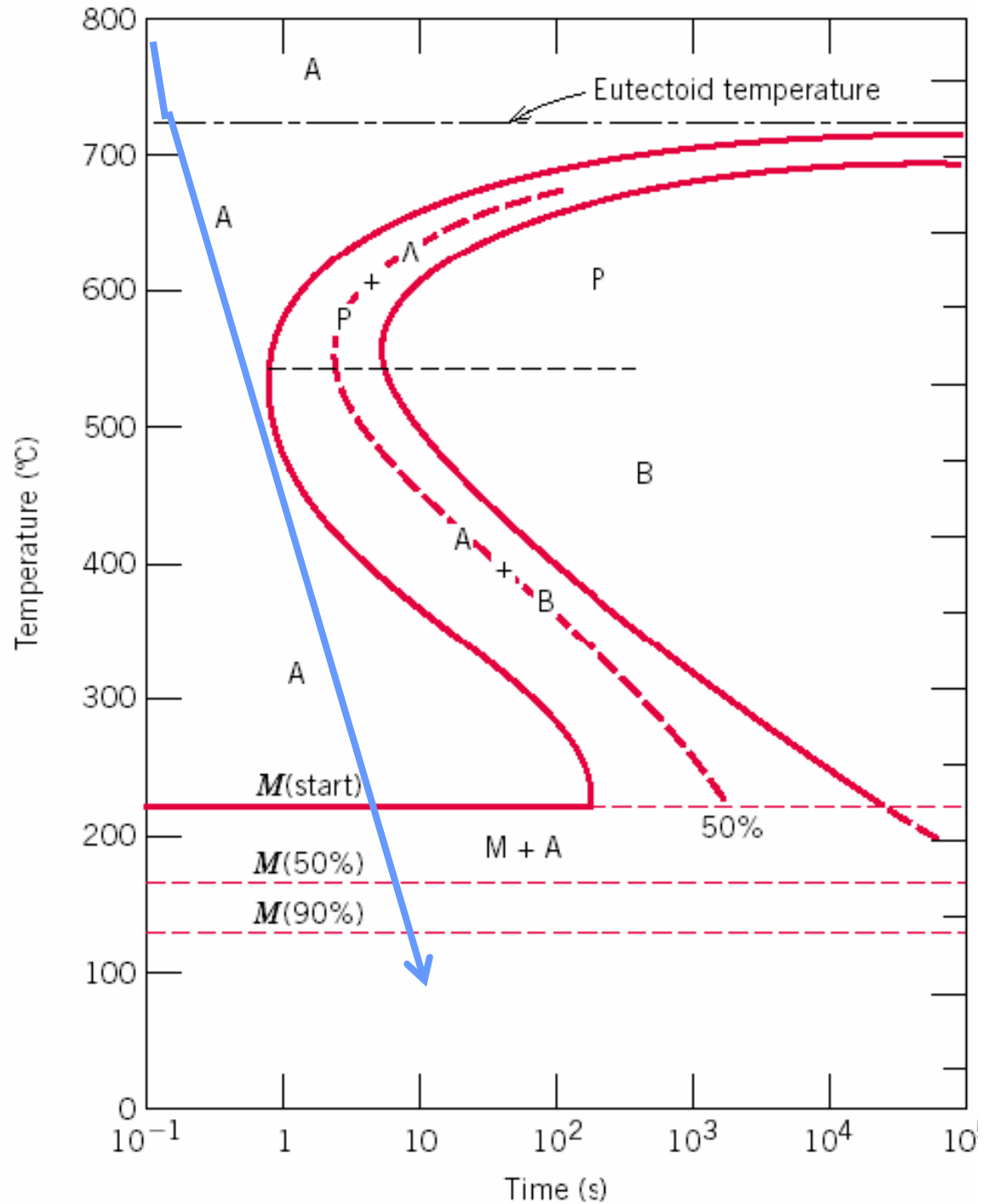
**Wykres przemian izotermicznych CTPi (czas, temperatura, przemiana)**





## Przemiana martenzytyczna

Zachodzi podczas szybkiego chłodzenia austenitu (z szybkością większą od szybkości krytycznej)



## Martenzyt:

przesycony roztwór stały węgla w żelazie  $\alpha$ , powstający podczas przemiany austenitu przechłodzonego do temperatury, w której nie zachodzi dyfuzja węgla.

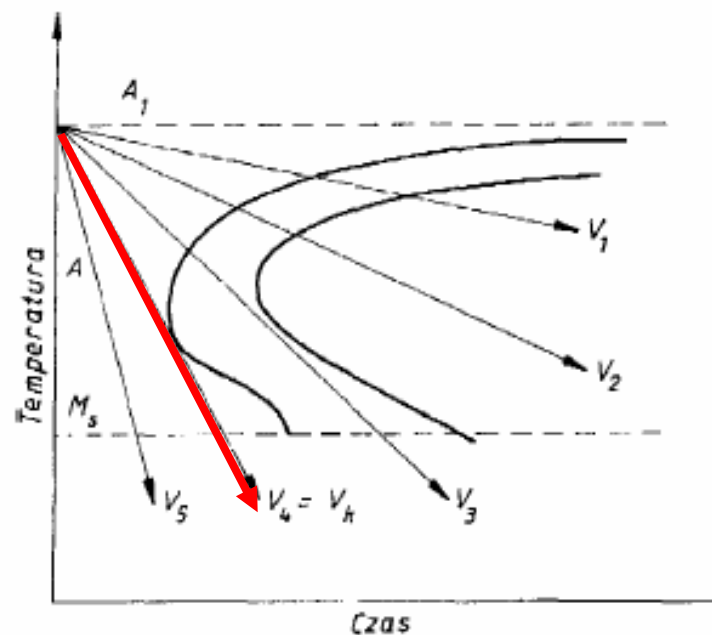
Objętość właściwa martenzytu jest większa niż austenitu

Jest strukturą stali o największej twardości, ale jest także bardzo kruchy;

Do zastosowań inżynierskich powinien być dalej obrabiany cieplnie przez „odpuszczanie”



24.6  $\mu\text{m}$

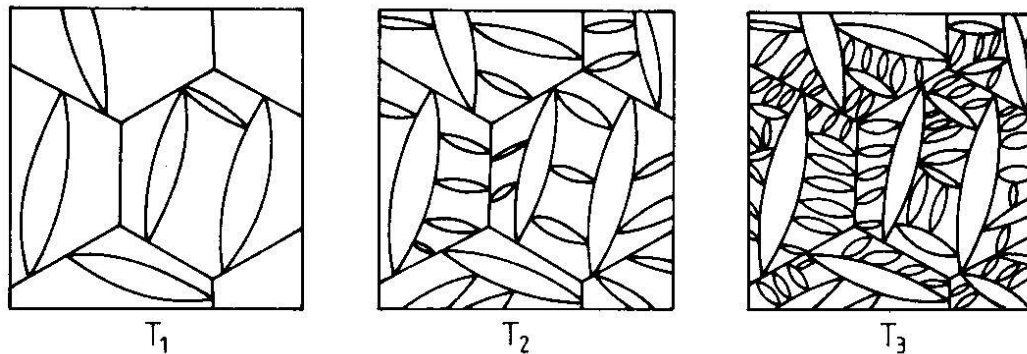


$V_k$  - krytyczna szybkość chłodzenia



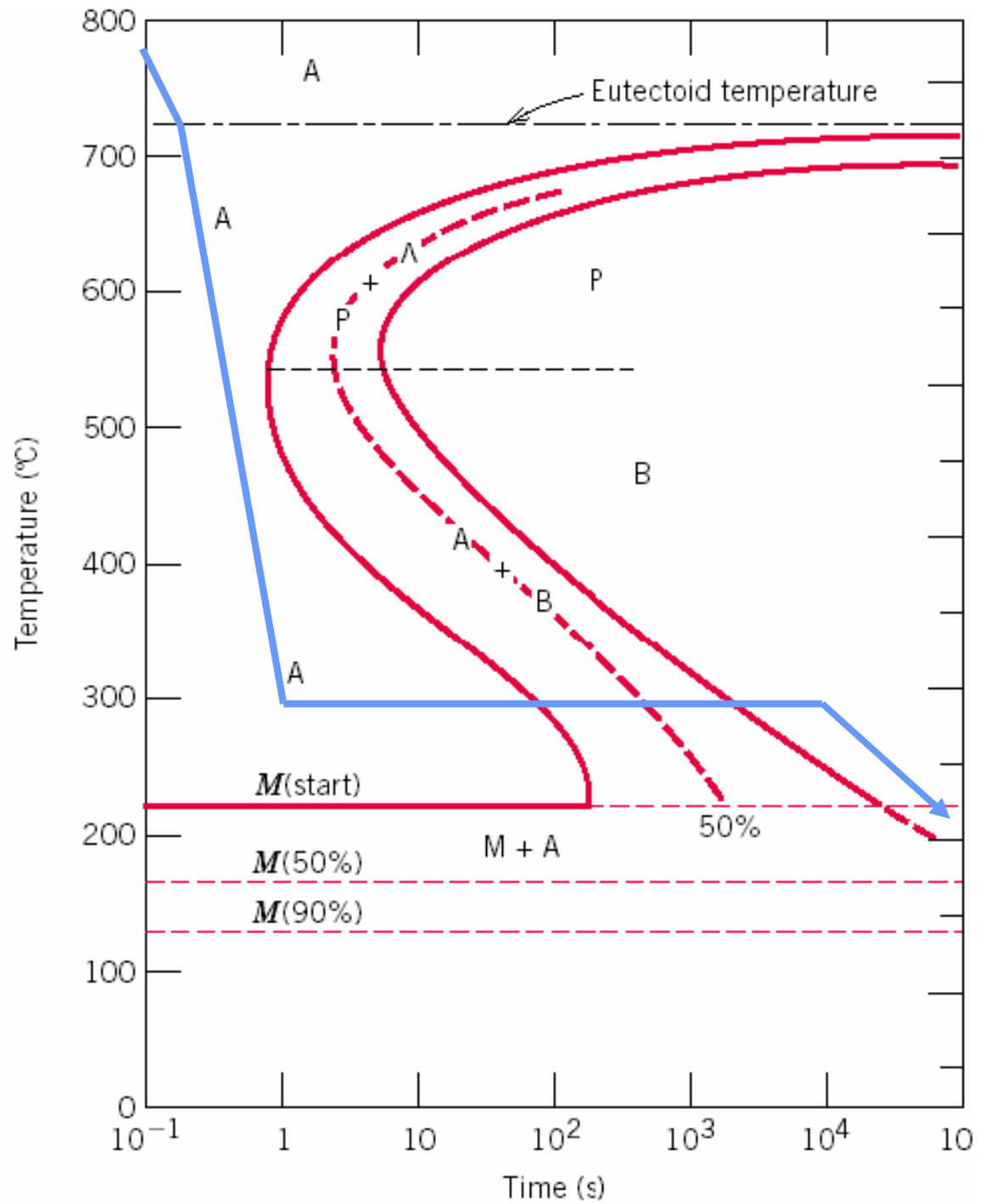
## Podstawowe cechy przemiany martenzytycznej:

- jest to przemiana bezdyfuzyjna, polega na przebudowie sieci przestrzennej faza  $\gamma$   $\longrightarrow$  faza  $\alpha$ , bez dyfuzji węgla
- martenzyt powstaje przy ciągłym obniżaniu temperatury w granicach od  $M_s$  do  $M_f$  temperatura  $M_s$  nie zależy od szybkości chłodzenia
- przemiana postępuje przez tworzenie się nowych igieł martenzytu, nie przez rozrastanie się poprzednio powstałych



- przemiana zostaje zahamowana przez rosnące naprężenia ściskające w austenicie, dlatego nie zachodzi do końca, zawsze pozostaje pewna ilość austenitu szcążkowego
- naprężenia rozciągające i odkształcenia plastyczne ułatwiają przemianę martenzytyczną
- przemiana martenzytyczna w stalach jest przemianą nieodwracalną

# Przemiana bainityczna

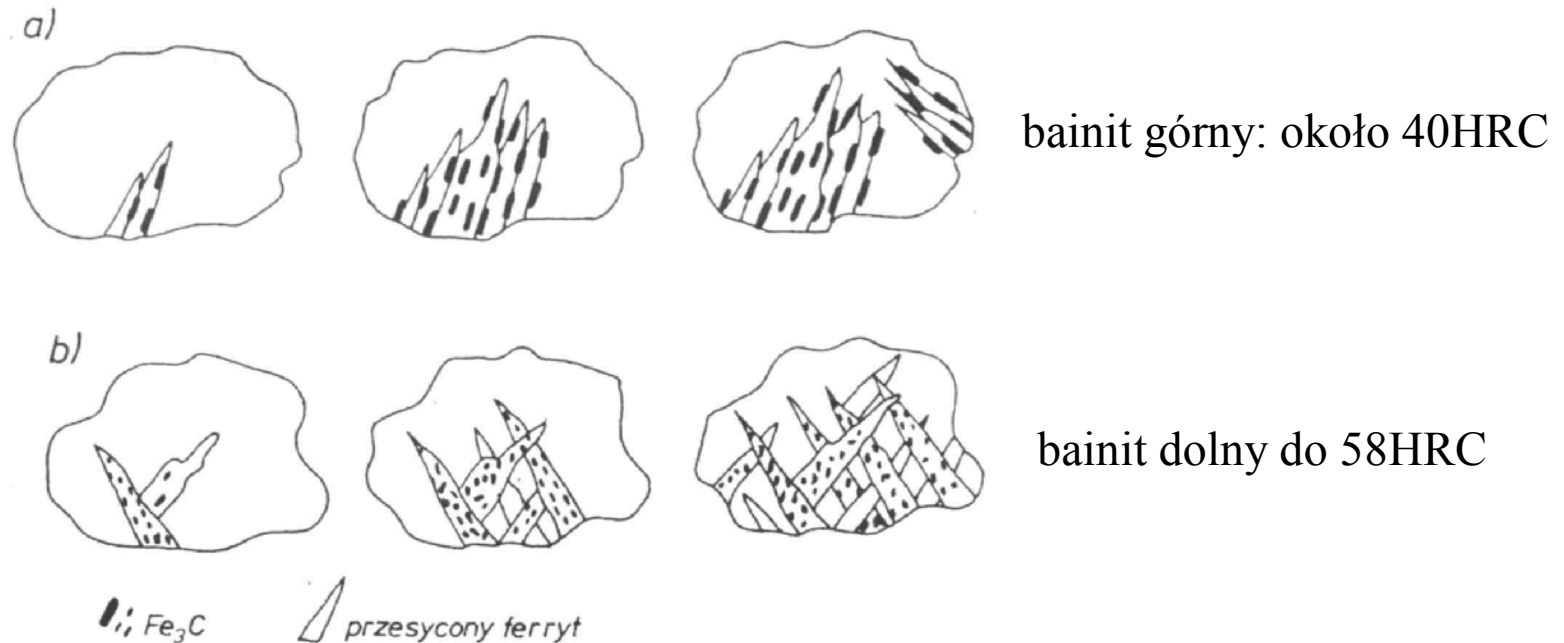


## Przemiana bainityczna:

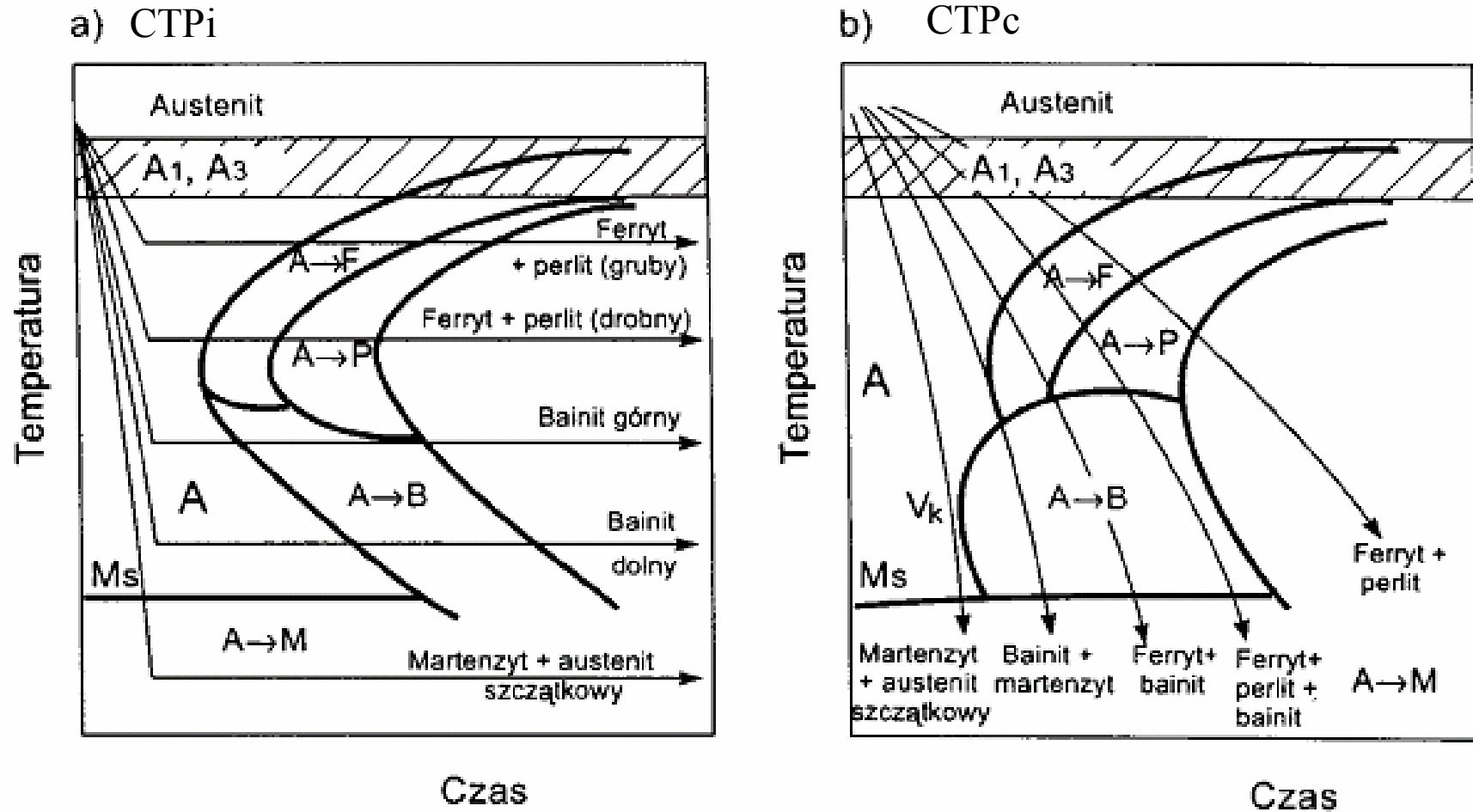
Przemiana pośrednia zachodzi w temperaturze ok. 500 – 300°C w warunkach utrudnionej dyfuzji.

Łączy cechy przemiany perlitycznej i martenzytycznej:

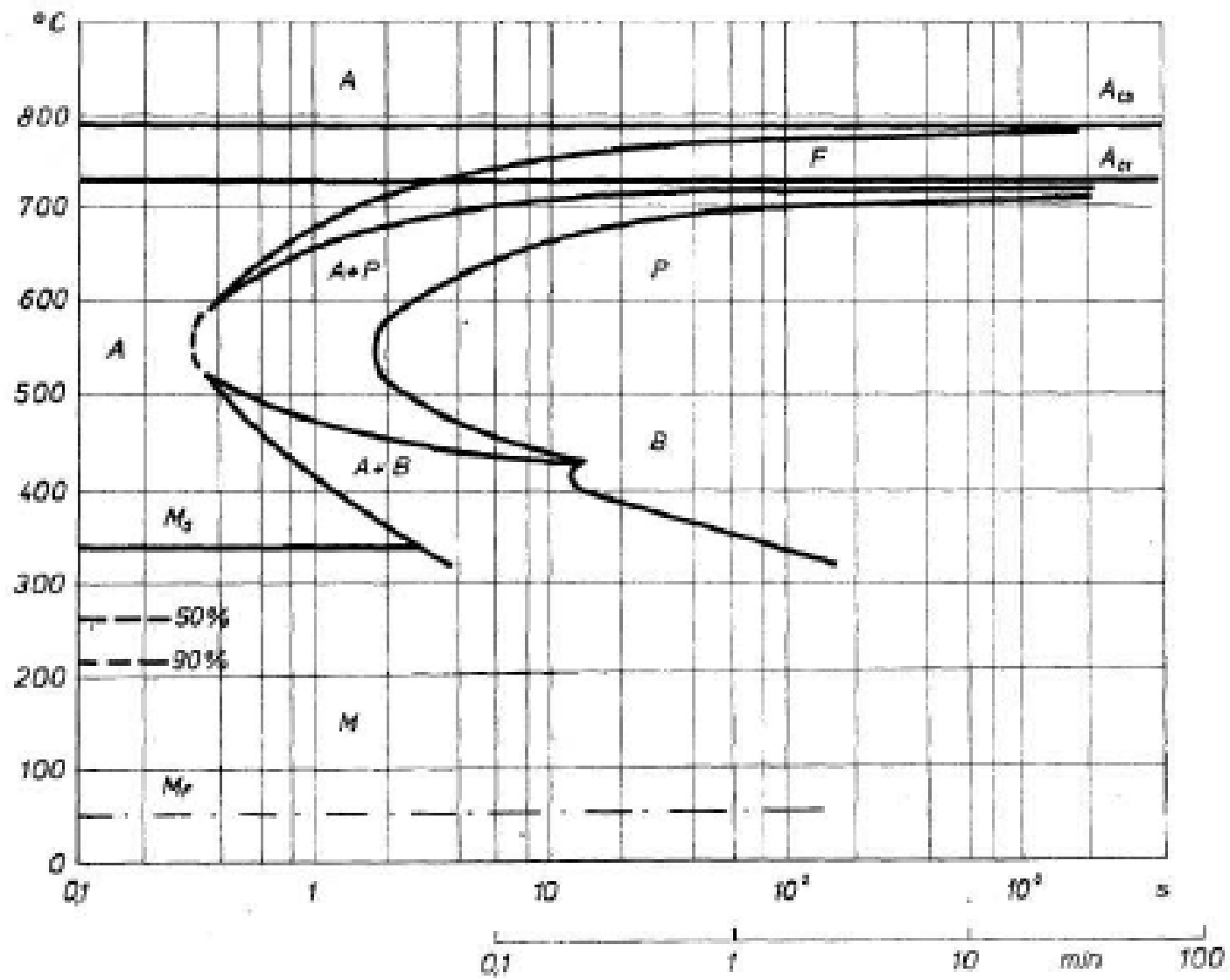
W wyniku rozpadu austenitu tworzą się zorientowane względem austenitu płytki ferrytu, z którego następnie wydzieliła się cementyt o kształcie kulkowym, wydłużonym lub iglastym.



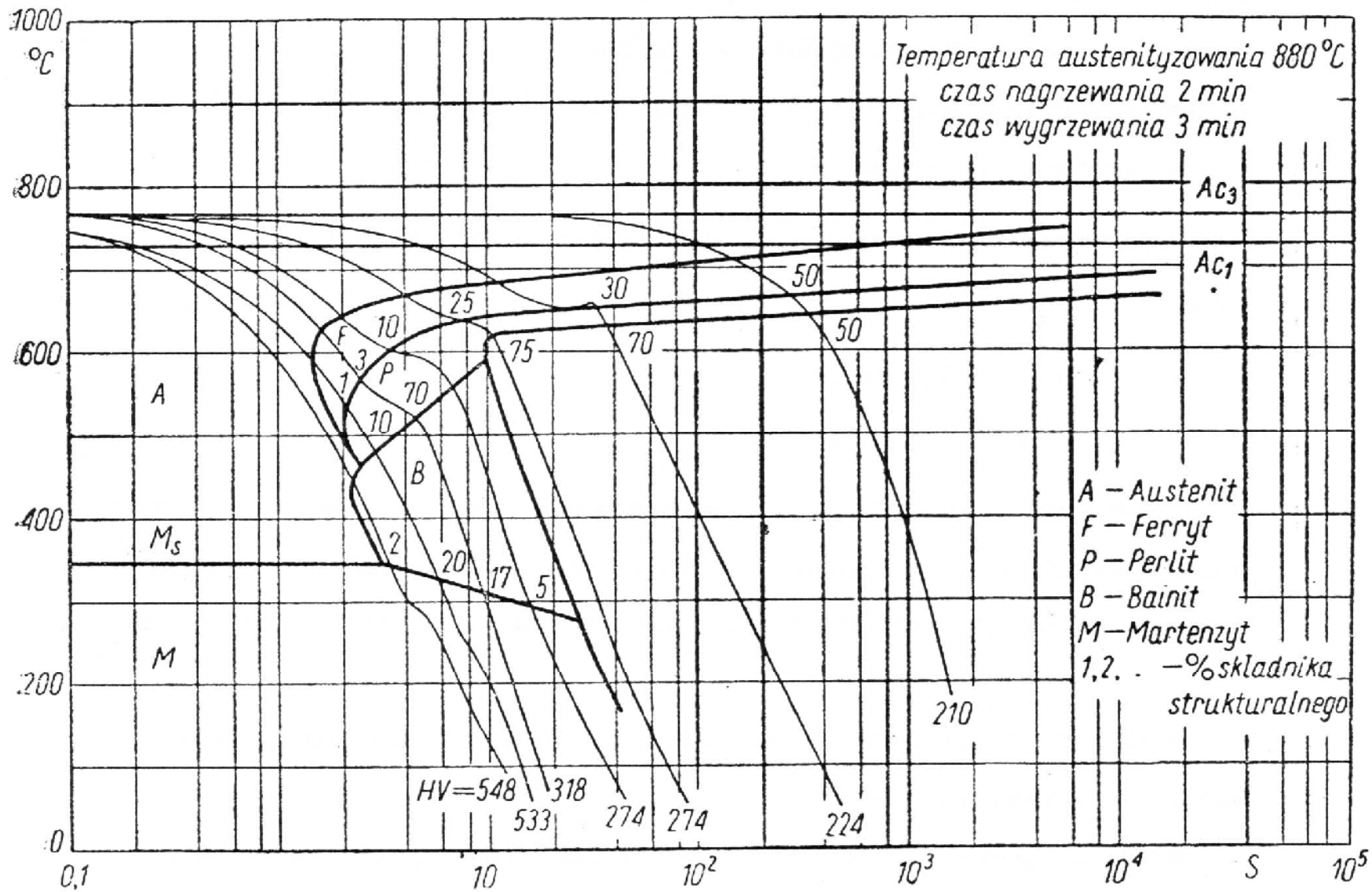
## Wykresy CTP dla stali podeutektoidalnej



Przebieg wykresów *CTP* (czas, temperatura, przemiana) i ich położenie względem osi czasu, jest zależny od zawartości węgla i pierwiastków stopowych w stali.



Wykres CTP<sub>i</sub> stali 45



Wykres CTPc dla stali o zawartości 0,45% C

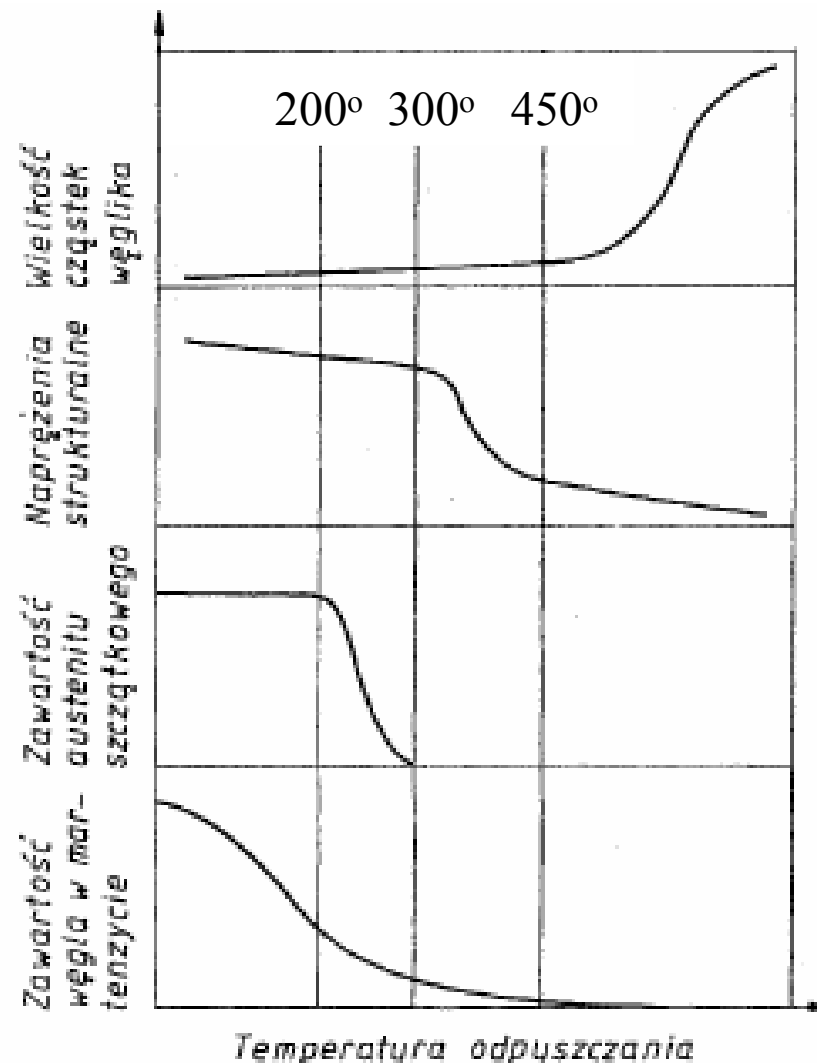
## Produkty przemian przechłodzonego austenitu

Zakres temp. przemiany [ °C ]	Produkt przemiany	Twardość	
		HB	HRC
727 ÷ 680	perlit	180 ÷ 250	< 30
680 ÷ 500	troostyt	250 ÷ 450	30 ÷ 45
500 ÷ 400	bainit górny	400 ÷ 500	40 ÷ 45
400 ÷ 300	bainit dolny	500 ÷ 600	45 ÷ 58
< 300	martenzyt	600 ÷ 700	58 ÷ 63

## Przemiany występujące podczas odpuszczania martenzytu

Martenzyt jest fazą metastabilną i w czasie odpuszczania ulega rozpadowi na trwalsze fazy.

W czasie odpuszczania z martenzytu wydzielają się bardzo drobne węgliki aż do uzyskania struktury sorbitu: ferrytu z bardzo drobnymi wydzieleniami kulkowego cementytu (sorbitu)







# Technologia obróbka cieplnej stopów metali

## **Obróbka cieplna stopów:**

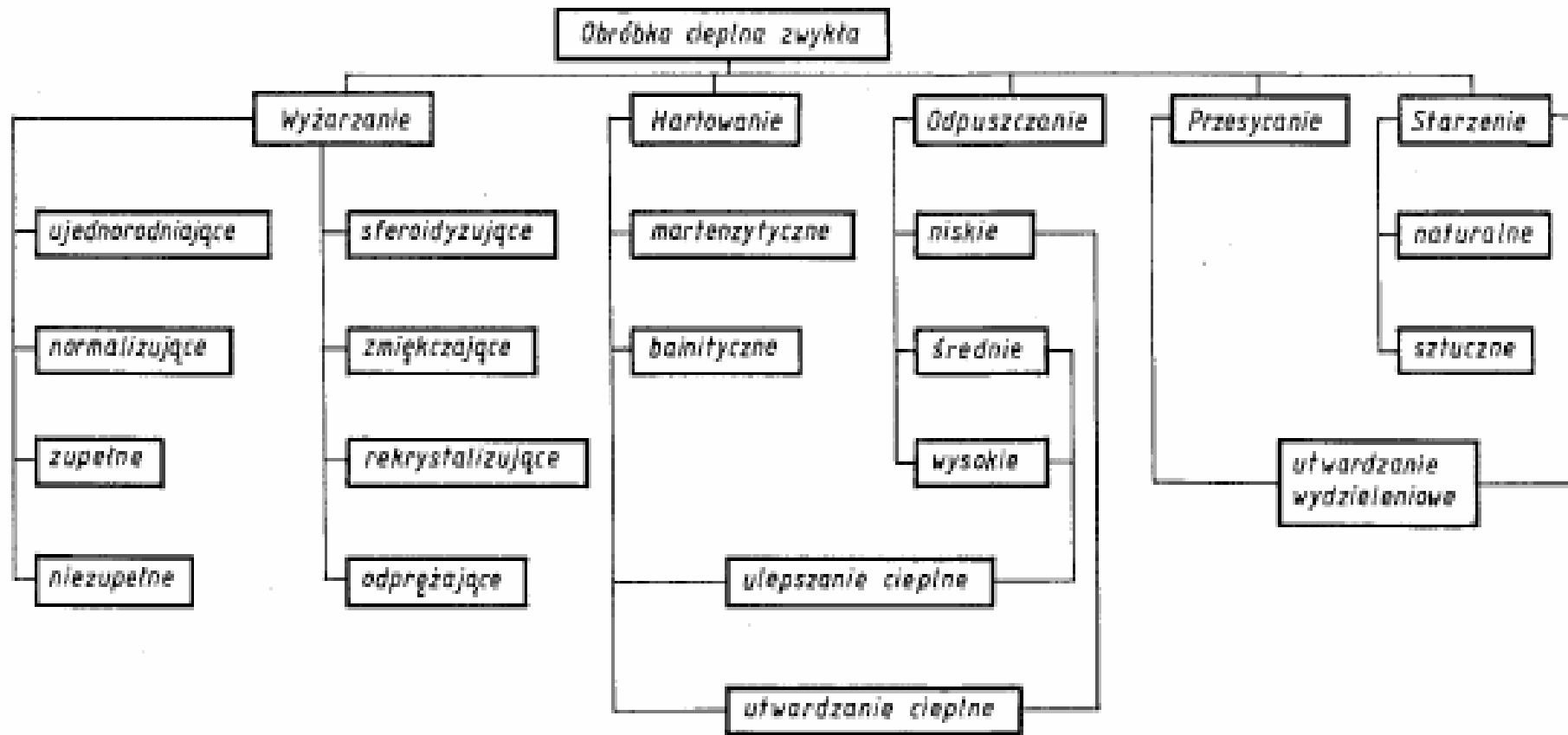
zabiegi cieplne, które mają na celu nadanie im pożądanych cech mechanicznych, fizycznych lub chemicznych przez zmianę struktury stopu.

Obróbka cieplna + zmiana składu warstw powierzchniowych za pomocą działania otaczającego ośrodka = **obróbka cieplno-chemiczna**

Obróbka cieplna + odkształcenie plastyczne = **obróbka cieplno-mechaniczna**

Obróbka cieplna + działanie pola magnetycznego = **obróbka cieplno-magnetyczna**

Podstawowe zabiegi obróbki cieplnej:  
wyżarzanie, hartowanie, odpuszczanie, przesycanie, starzenie



## **Wyżarzanie:**

polega na nagrzeniu materiału do określonej temperatury, wygrzaniu w tej temperaturze i chłodzeniu z odpowiednią szybkością.

## **Rodzaje wyżarzania:**

### **Ujednoradniające:**

temperatura  $100 - 150^{\circ}\text{C} < \text{Solidus}$  (stal  $1000-1250^{\circ}\text{C}$ ),+ studzenie.

Cel: zmniejszenie miejscowych niejednorodności materiału

### **Normalizujące:**

temperatura  $30-50^{\circ}\text{C}$  powyżej linii  $\text{Ac}_3+\text{Ac}_m$  studzenie w spokojnym powietrzu.

Cel: otrzymanie równomiernie drobnoziarnistej struktury F i P

### **Zupełne:**

temperatura jak przy normalizacji + studzenie powolne, z piecem.

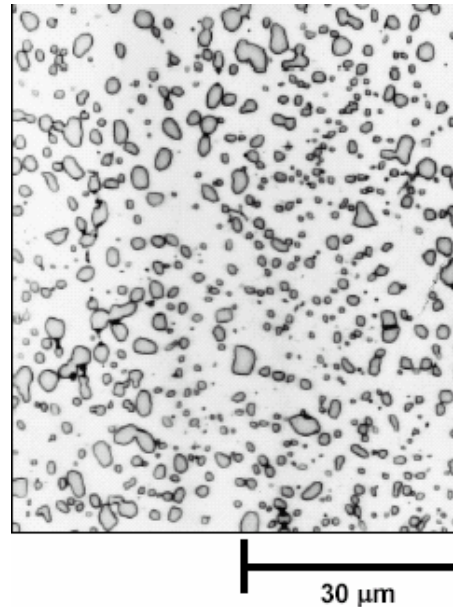
Cel: otrzymanie struktur równowagowych, zmiękczenie stali,

**Sferoidyzujące** (zmiękczające):

temperatura około  $A_{c1}+$  dowolne studzenie

Cel: nadanie stali możliwie małej twardości poprzez sferoidyzację cementytu

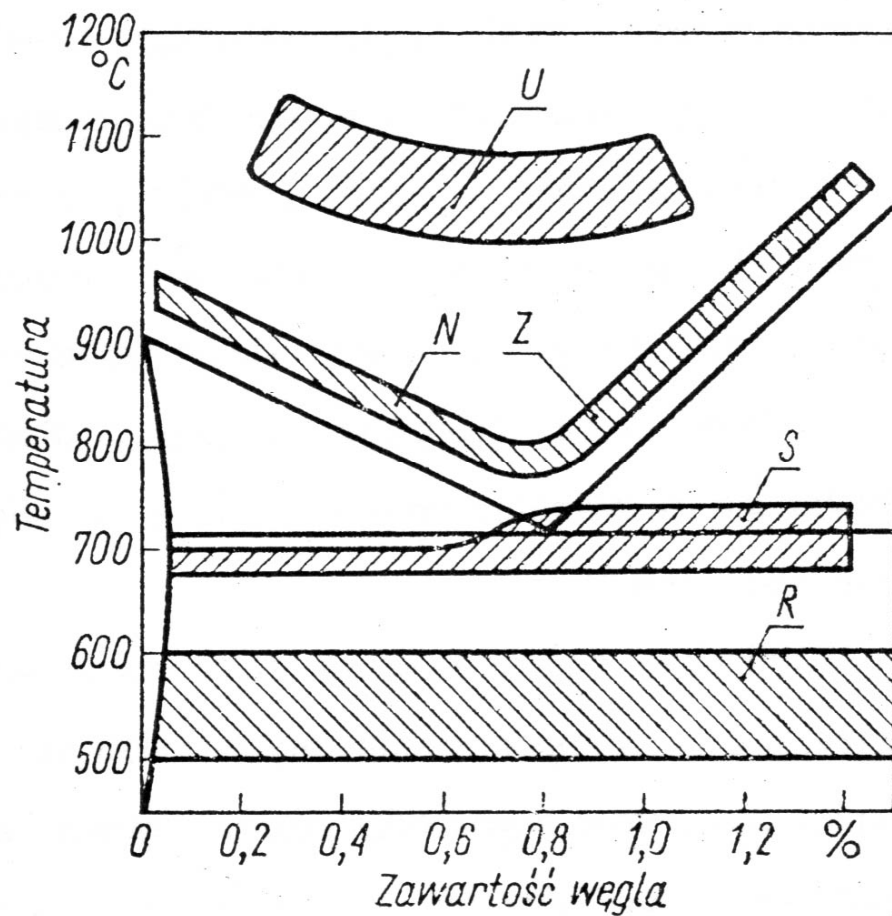
Struktura stali po wyżarzaniu  
sferoidyzującym



**Rekrytalizujące:** wyżarzanie metalu po zgnioście na zimno (stal 500-600°C)

**Odprężające:** temperatura niższa niż dla rekrytalizacji, celem usunięcia naprężeń własnych

## Zakresy temperatur wyżarzania stali



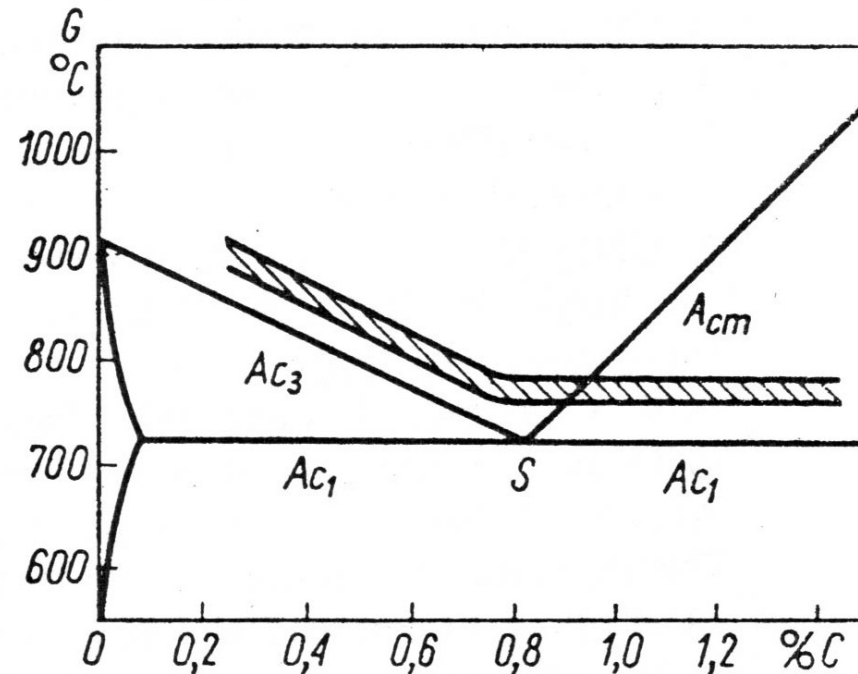
- U – ujednoradniające
- N – normalizujące
- Z – zupełne
- S – sferoidyzujące
- R - rekrytalizujące

## Hartowanie

Stal do hartowania musi być nagrzana do zakresu istnienia austenitu:

30-50°C powyżej  $A_{c3}$  dla stali podutektoidalnych

30-50°C powyżej  $A_{c1}$  dla stali nadeutektoidalnych



W tych temperaturach następuje całkowita zamiana perlitu i ferrytu w austenit i nie następuje nadmierny rozrost ziaren austenitu, co pozwala uzyskać drobnoiglasty martenzyt po chłodzeniu.

**Chłodzenie przy hartowaniu** musi się odbywać z szybkością większą od krytycznej. Zależy od ciepła właściwego i przewodnictwa cieplnego przedmiotu, oraz jego kształtu i wielkości oraz od **zdolności chłodzących ośrodków**.

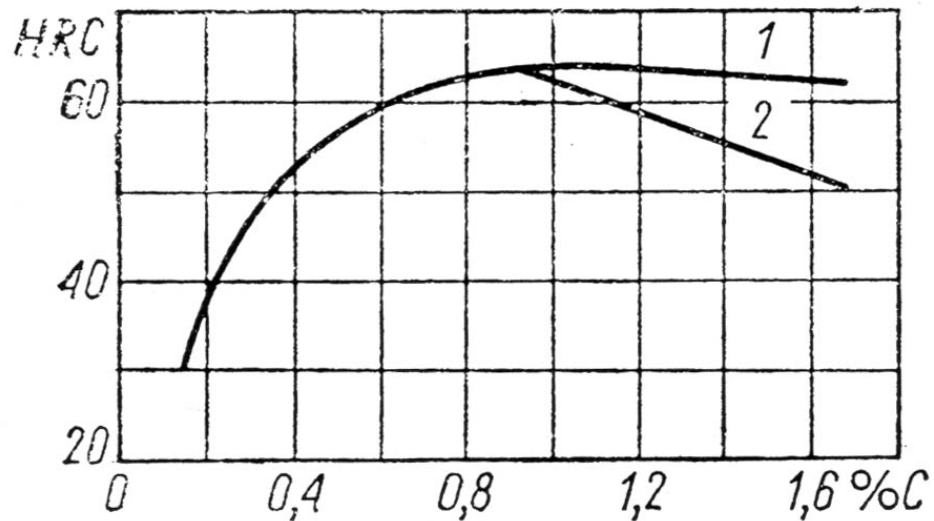
Jako ośrodki chłodzące najczęściej stosuje się:  
wodę, olej, powietrze

## Hartowność stali:

Jest to zdolność do tworzenia struktury martenzytycznej

Wyrażana jest przyrostem twardości po hartowaniu w zależności od warunków austenityzowania i szybkości chłodzenia

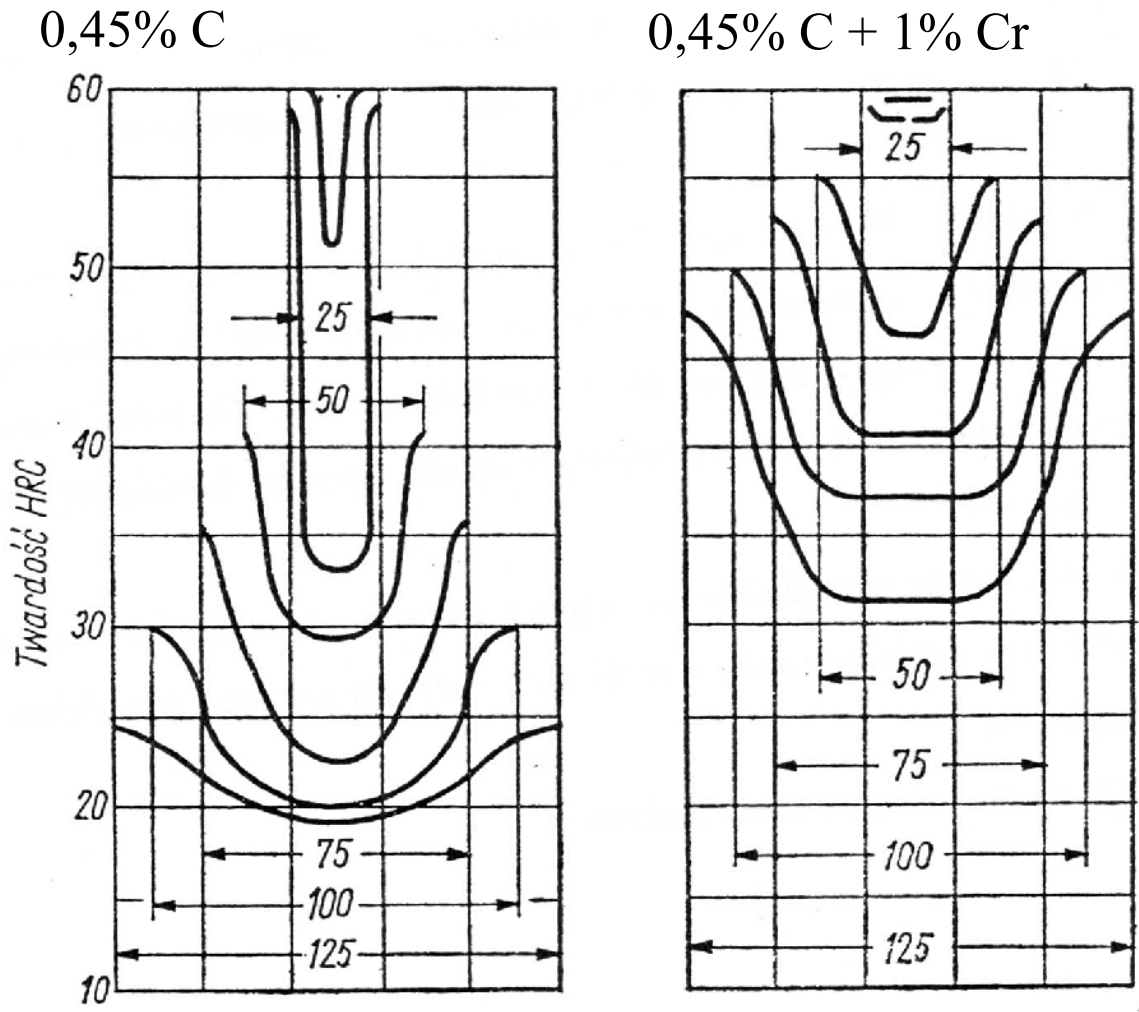
**Utwardzalność:** zdolność do utwardzania się stali przy hartowaniu wyrażona maksymalną twardością na powierzchni w optymalnych warunkach hartowania. Zależy od ilości węgla (i pierwiastków stopowych) w austenicie.



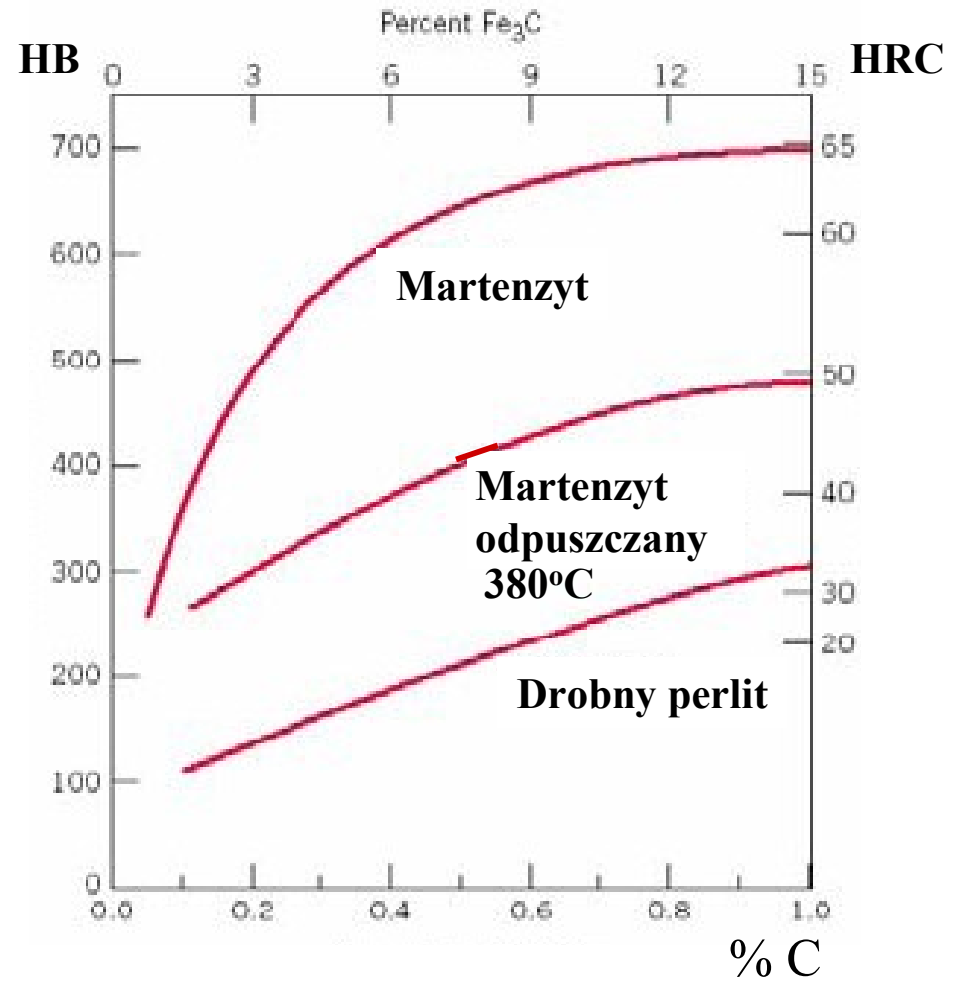
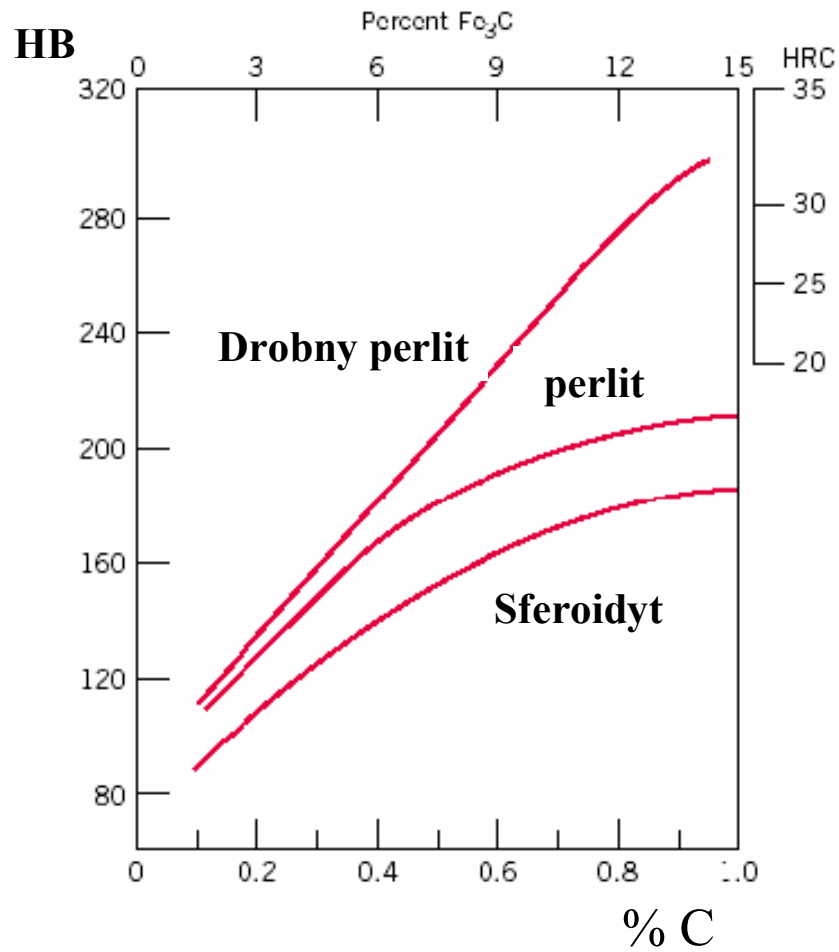
1 – temperatura właściwa  
2 – temperatura za wysoka



**Przehartowalność:** podatność stali na hartowanie wyrażona grubością warstwy zahartowanej na przekroju hartowanego przedmiotu. Zależy od: składu chemicznego stali (im więcej węgla i pierwiastków stopowych tym hartowność większa), intensywności chłodzenia, przekroju hartowanego przedmiotu



# Wpływ zawartości węgla na twardość

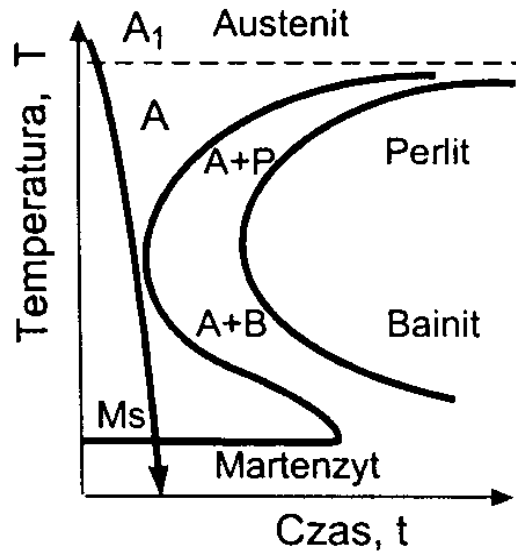


## Rodzaje hartowania

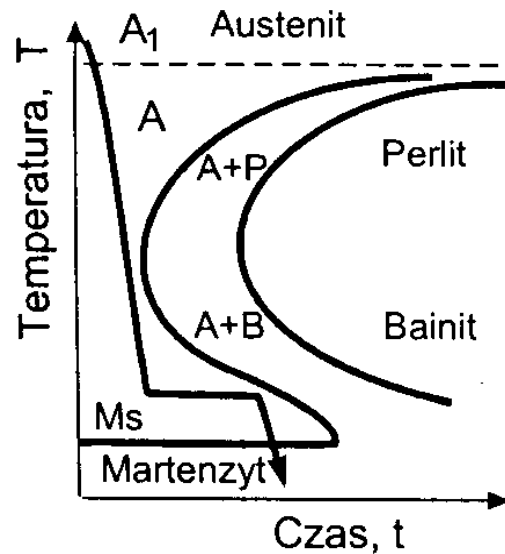
**Objętościowe:** gdy obejmuje całą objętość przedmiotu, a grubość warstwy zahartowanej zależy wyłącznie od właściwości materiału.

Wyróżnia się hartowanie martenzytyczne (zwykłe i stopniowe) i bainityczne.

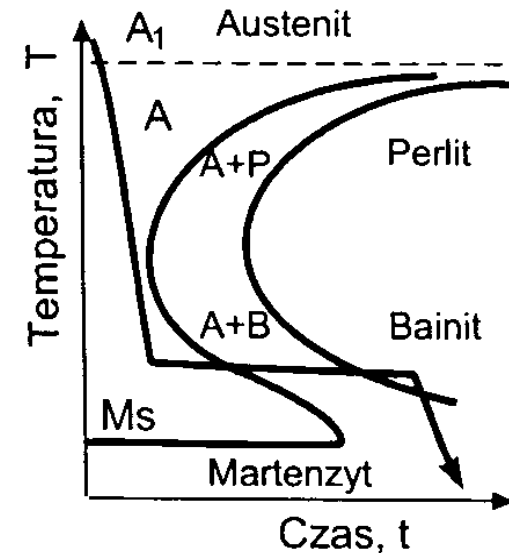
hartowanie martenzytyczne  
zwykłe



stopniowe



hartowanie bainityczne



**Powierzchniowe:** polega na szybkim nagraniu warstwy wierzchniej przedmiotu do temperatury hartowania i szybkim jej ochłodzeniu w celu utwardzenia jedynie powierzchni detalu i pozostawienia miękkiego, ciągliwego rdzenia.

## Naprężenia hartownicze

**Naprężenia cieplne** powstają na skutek nierównomiernego chłodzenia przedmiotu w trakcie hartowania i zmian jego objętości.

Wynikiem naprężeń cieplnych są naprężenia ściskające na powierzchni i rozciągające w rdzeniu

**Naprężenia strukturalne** występują na skutek różnic objętości właściwej austenitu i martenzytu.

**Naprężenia hartownicze mogą wywołać:**

- **zmiany wymiarowe i odkształcenia**
- **paczenie przedmiotów**
- **pęknięcia hartownicze**

**Spawalność (metalurgiczna):** zdolność do tworzenia dobrej jakości złącz spawanych. Zależy od składu chemicznego stali, który powinien ograniczać możliwość powstawania kruchych struktur (martenzyt, bainit) w strefie spawania, które mogłyby powodować pęknięcie spawów.

## Odpuszczanie

Polega na nagraniu zahartowanej stali do temperatur niższych niż  $A_c1$ , przetrzymaniu w tej temperaturze i chłodzeniu do temperatury otoczenia.

Rodzaje odpuszczania:

**niskie** (100-250°C):

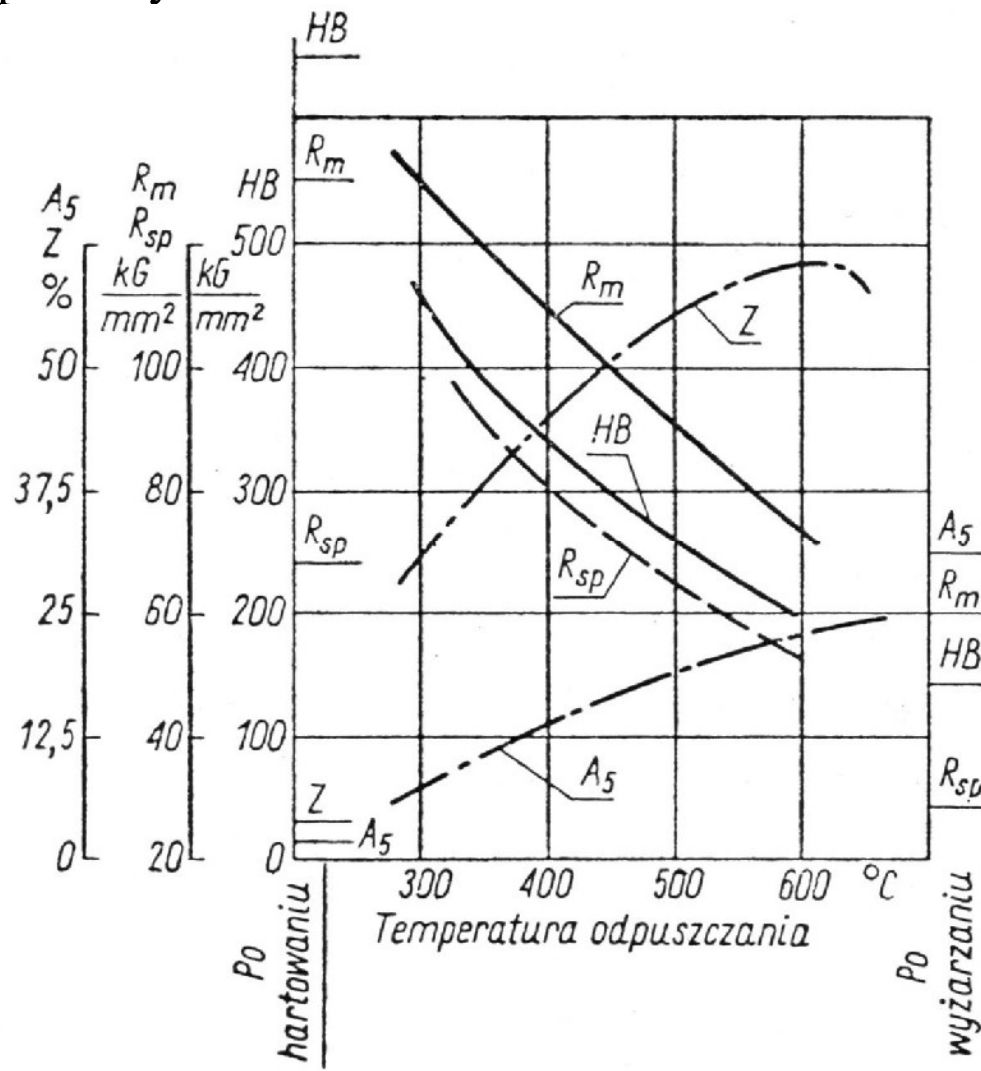
zmniejszenie naprężeń własnych materiału

**średnie** (250-450°C)

wysokie  $R_e$  i  $R_{sp}$ ,  
wyższa udarność,  
HB: 450 kG/mm<sup>2</sup>

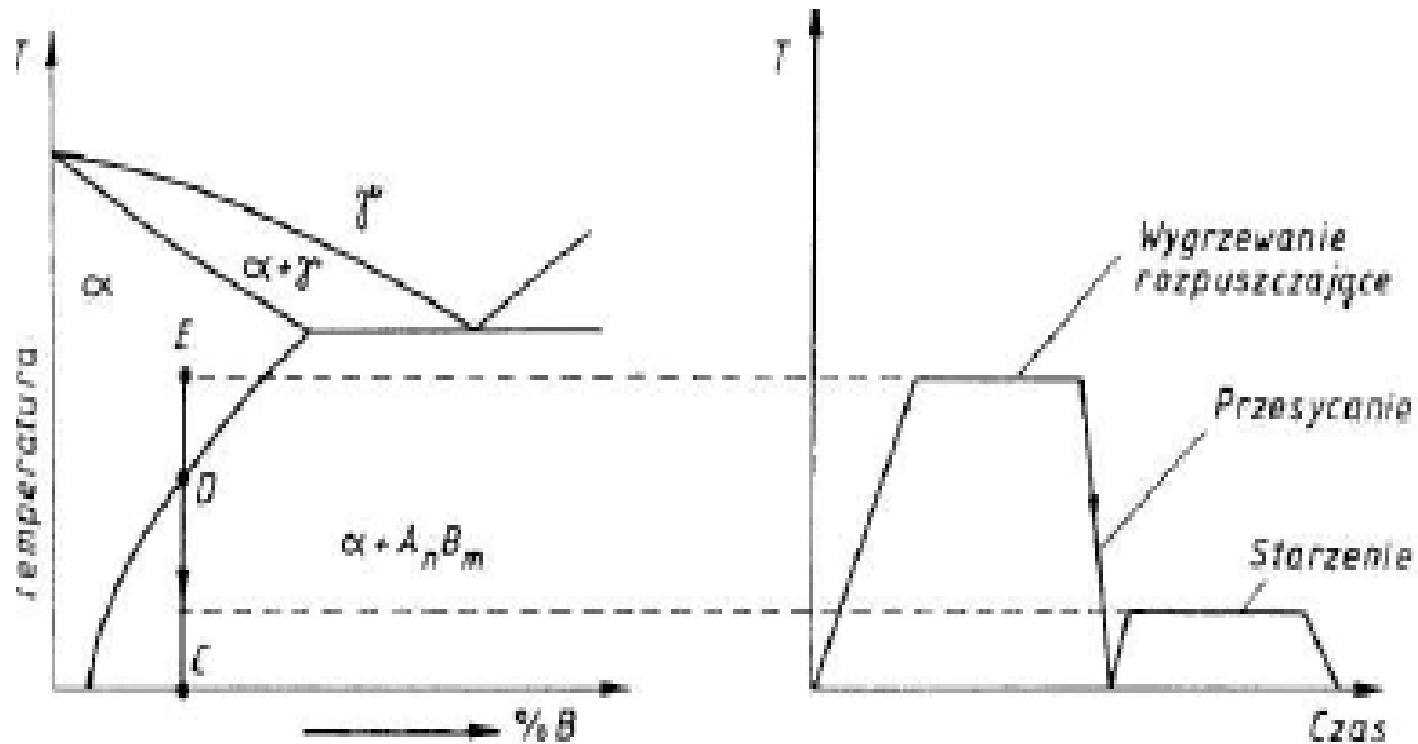
**wysokie** (450-600°C)

wysoka udarność i ciągliwość,  
wysoki  $R_e/R_m$ ,  
HB: 250-400 kG/mm<sup>2</sup>



**Hartowanie + wysokie odpuszczanie = ulepszenie cieplne**

## Przesycanie i starzenie



W wyniku **przesycania** poprawiają się właściwości plastyczne, natomiast zmniejsza się wytrzymałość i twardość .

**Starzenie** powoduje poprawę właściwości wytrzymałościowych i twardości oraz pogorszenie plastyczności .

**przesycanie + starzenie = utwardzanie wydzieleniowe**

## **Obróbka cieplno-chemiczna**

Polega na dyfuzyjnym wprowadzeniu do warstwy powierzchniowej materiału obcego pierwiastka, celem spowodowania zmian jej właściwości.

Najczęściej wykonywane zabiegi obróbki cieplno-chemicznej to:

- Nawęglanie
- Azotowanie

także

- Węgloazotowanie
- Siarkoazotowanie
- Borowanie

**Nawęglanie** polega na nasyceniu warstwy powierzchniowej stali węglem. Stosuje się w celu uzyskania twardej, odpornej na ścieranie warstwy powierzchniowej przy zachowaniu ciągliwego rdzenia.

Nawęglanie przebiega zwykle w temperaturze 900-950°C.

Grubości warstw nawęglanych zwykle 0,5 -2mm.

Przeprowadza się w ośrodkach stałych (w proszkach), gazowych, próżniowo, jonizacyjnie.

Po nawęglaniu stal obrabia się cieplnie przez hartowanie i niskie odpuszczanie

**Azotowanie** polega na nasycaniu warstwy powierzchniowej stali azotem. Roztwór stały azotu w żelazie i obecność drobnych wydzieleni azotków żelaza i pierwiastków stopowych powoduje wysoką twardość powierzchni azotowanej.

Azotowanie przeprowadza się w temperaturach 480-550°C.

Grubości warstw azotowanych 0,1 - 0,6mm.

Stosuje się w celu uzyskania twardej, odpornej na ścieranie warstwy, a także polepszenia odporności na korozję i zmniejszenia współczynnika tarcia.

Azotowanie jest końcową operacją technologiczną.