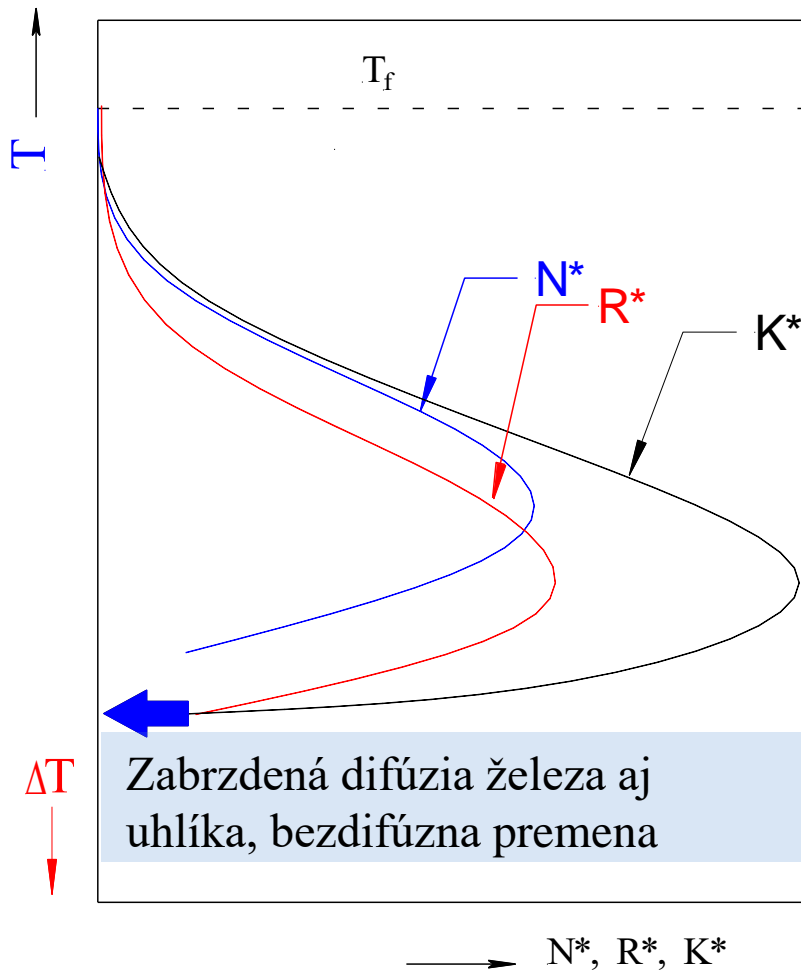


# Eutektoidná, bainitická a martenzitická premena

Prof. Ing. Peter Palček, PhD.

Katedra materiálového inžinierstva

# 1. Fázové premeny



Fázové premeny sa uskutočňujú dvoma pochodmi: **tvorbou zárodka** (nukleáciou) a **rastom zárudkov**. Rýchlosť nukleácie závisí od veľkosti podchladenia, lebo sa zväčšuje rozdiel voľnej entalpie rozpadajúcej a vznikajúcej fázy.

Vznik kritickej veľkosti zárodka a jeho ďalší rast je tiež podmienený difúziou atómov, ktorá sa s podchladením znižuje, takže celková rýchlosť premeny sa zvyšuje (t.j. inkubačná doba začiatku premeny sa skraca) len do určitej úrovne podchladenia a potom zase klesá. Tento priebeh sa plne prejavuje aj pri premene podchladeného austenitu.

- Vlastnosti materiálov závisia nielen od chemického zloženia, ale **aj od štruktúry**. Požadovanú štruktúru možno dosiahnuť tepelným spracovaním, t.j. riadenými tepelnými cyklami (**pozor, aj tvárnením za studena – iná prednáška**).

- Tento proces výhodne môžeme vysvetliť na zliatinách

Fe - C.



Prezentácia  
icrosoft PowerPoin

- Prečo?
- Železo má:
  - v tuhom stave tri modifikácie (polymorfne premeny) – má tri rôzne kryštalografické mriežky
  - obmedzenú rozpustnosť uhlíka, ktorá klesá s teplotou
- Pri tvorbe štruktúry prebiehajú nasledovné **fázové premeny**:
  - Austenitizácia, austenitická premena
  - Perlitická premena,
  - Bainitická premena
  - Martenzitická premena,
  - Premeny pri popúšťaní,
  - Rozpad presýtených tuhých roztokov (precipitácia, segregácia...)

## 2. Austenitizácia

- Austenitizáciou rozumieme ohrev materiálu do oblasti austenitu
- Je to premena heterogénnej feriticko-karbidickej (friticko-cementitickej) štruktúry na homogénny austenit, ktorá nastáva pri ohreve nad prekryštalizačné teploty a výdrži na týchto teplotách (difúzna premena)
- Homogenizácia austenitu - vyrovnanie chemickej heterogenity v austenite
- Teplota – vyššia ako prekryštalizačná; výška teploty austenitizácie závisí od chemického zloženia ocele
- Doba výdrže – slúži k získaniu homogénnej štruktúry, ak je príliš dlhá, vedie k zhrubnutiu zrna ( dedičnosť )
- Rast austenitického zrna je nežiadúci jav, ktorý je dôsledkom príliš vysokej austenitizačnej teploty alebo dlhej výdrže na tejto teplote.
- Austenit je pre väčšinu procesov TS východiskovou štruktúrou



# *Mechanizmus austenitizácie*

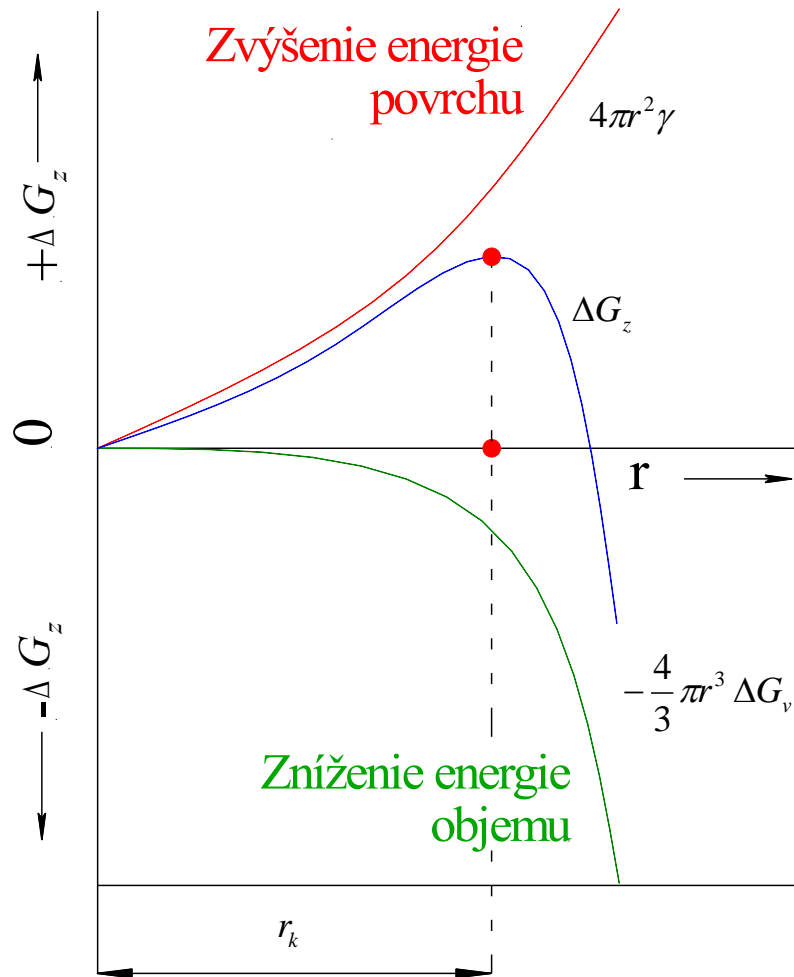
**Vznik austenitu** z feriticko - karbidickej štruktúry sa uskutočňuje zmenou mriežky  $Fe\alpha(C) \rightarrow Fe\gamma(C)$  a zmenou rozmiestnenia atómov uhlíka. V prípade čistého železa nastáva iba zmena mriežky.

**$Fe\alpha$**  – (izbová teplota –  $910^{\circ}\text{C}$ ), K8 (kubická priestorovo centrovaná mriežka)  
BCC ( body-centered cubic lattice)

**$Fe\gamma$**  – (  $910^{\circ}\text{C} - 1392^{\circ}\text{C}$  ), K12 (kubická plošne centrovaná mriežka)  
FCC ( face-centered cubic lattice)

Karbid železa – **cementit** –  **$Fe_3C$** , je tvrdý a oteruvzdorný (asi  $10\times$  tvrdší ako oceľ), ale aj veľmi krehký. Cementit, ako súčasť ocele a liatin zvyšuje pevnosť základnej hmoty, tvrdosť a odolnosť voči opotrebeniu, zhoršuje však obrábateľnosť. Množstvo a rýchlosť vzniku cementitu v tavenine ovplyvňuje aj prítomnosť legovacích prvkov napr. mangánu, chrómu (chrómovy cementit  $Cr_{23}C_6$ ), 1:3 ( $Cr_3C$ ), 7:3 ( $Cr_7C_3$ ) a 3:2 ( $Cr_3C_2$ ).

# Zárodky pri rozpade austenitu prebiehajú heterogénnou nukleáciou



Heterogénna nukleácia - vzniká napr. na inklúziách, precipitátoch, segregátoch...

*Vytvorenie zárodku nevedie automaticky aj k rastu novej fázy.*

Na to, aby zo zárodku vyrástol nejaký kryštalografický útvar, je potrebné, aby zárodok dosiahol kritický polomer.

Energia zárodku počas premeny najprv rastie. Je to spôsobené tým, že okolie zárodku naň spočiatku pôsobí ako energetická bariéra

Ak zárodok dosiahne kritický polomer ( $r_k$ ), pri ktorom je jeho energia už väčšia, ako samotná energetická bariéra, môže zo zárodku vyrásť kryštalografický útvar. Ak zárodok túto energetickú bariéru neprekoná, počas fázovej premeny zaniká.

# Eutektoidná premena

Je to heterogénna fázová premena, ktorá sa vyznačuje tepelne aktivovaným prenosom hmoty **na dlhú** vzdialenosť.

Pri eutektoidnej premene sa rozpadá vysokoteplotná fáza, ktorá môže byť tuhým roztokom (austenit) alebo **intermediárna fáza** (Cu-Zn) na zmes dvoch fáz.

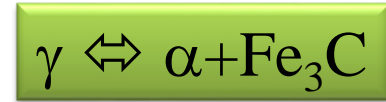
V oceli  $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ , v mosadzi  $\text{Cu}_7\text{Zn}_{20} \rightleftharpoons \text{Cu}_5\text{Zn}_8 + \text{Cu}_2\text{Zn}_8$

Eutektoidnej premene predchádzajú v podeutektoidných alebo nadeutektoidných zliatinách proeutektoidné premeny, pri ktorých vzniká len jedna z fáz tvoriacich eutektoid.



# Perlitická premena

• Perlitická premena austenitu prebieha pri pomerne vysokých teplotách (nad  $550^{\circ}\text{C}$ ), keď je v plnom rozsahu účinná difúzia uhlíka, prísadových prvkov a tiež aj samodifúzia železa.

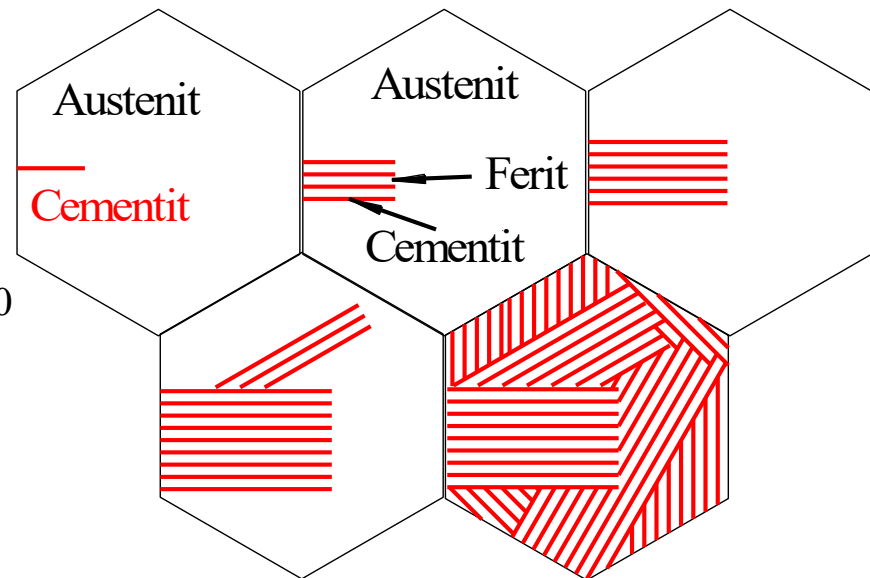
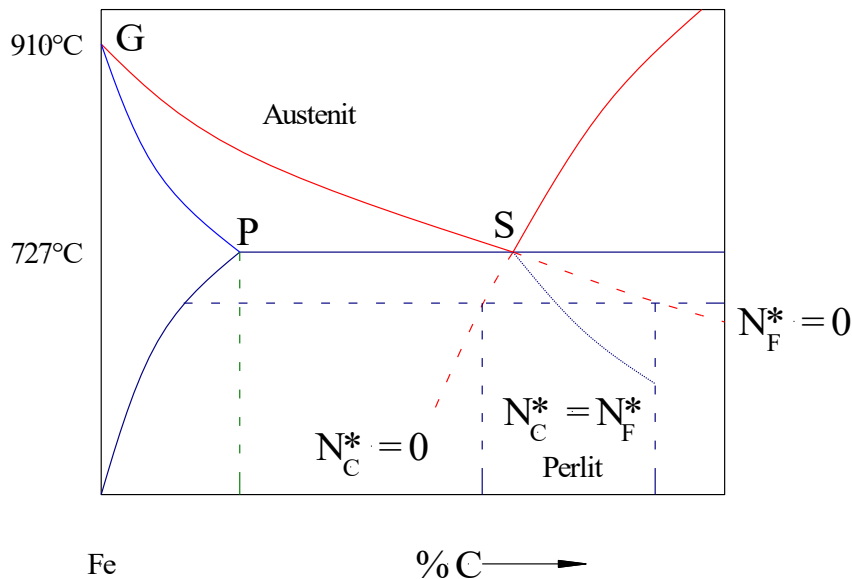


• Vznik perlitu je charakterizovaný dvoma procesmi.

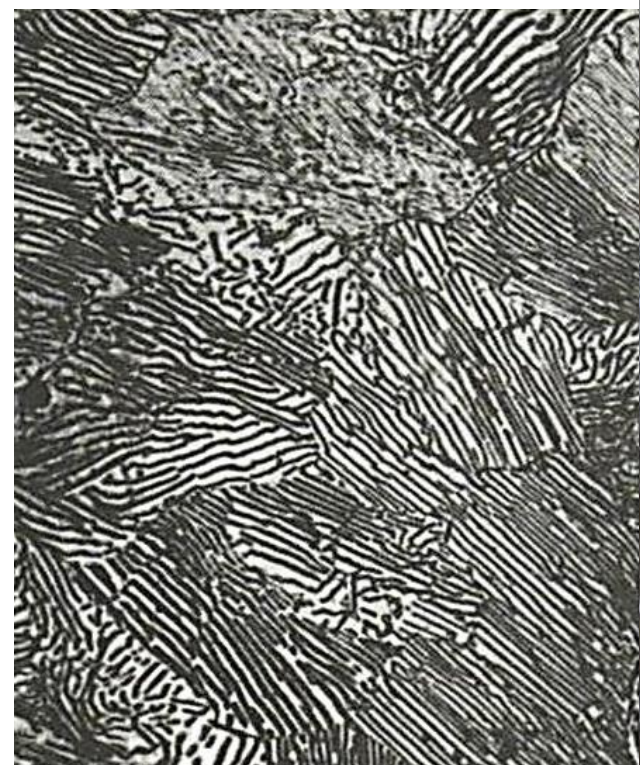
1. polymorfná premena železa  $\gamma$  na železo  $\alpha$ , s ktorou je spojená výrazná zmena rozpustnosti uhlíka.

2. Uhlík prítomný v množstve väčšom, než je jeho rozpustnosť vo ferite, sa vylúči ako cementit  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

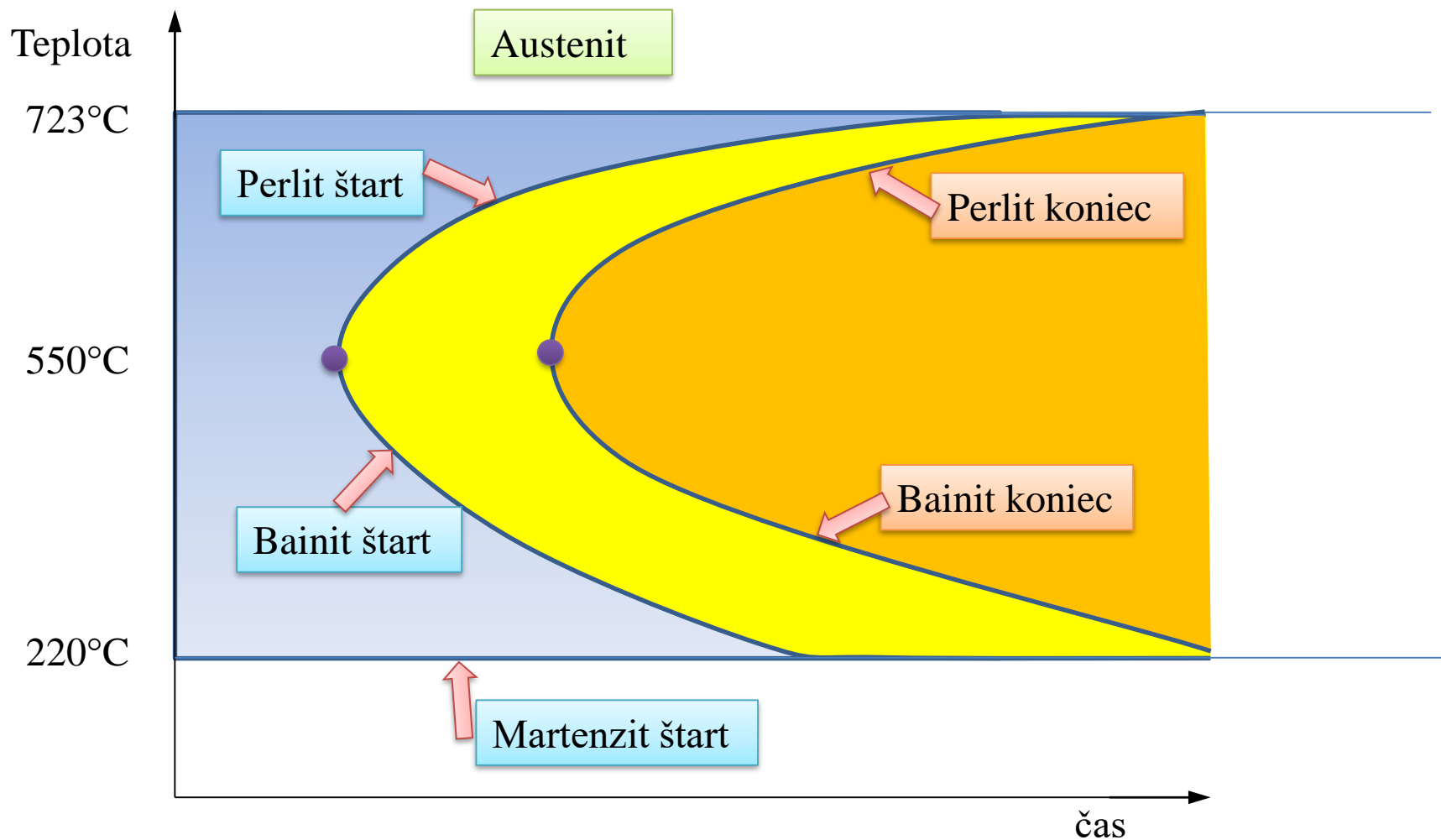
*Prebieha difúzia železa aj uhlíka*



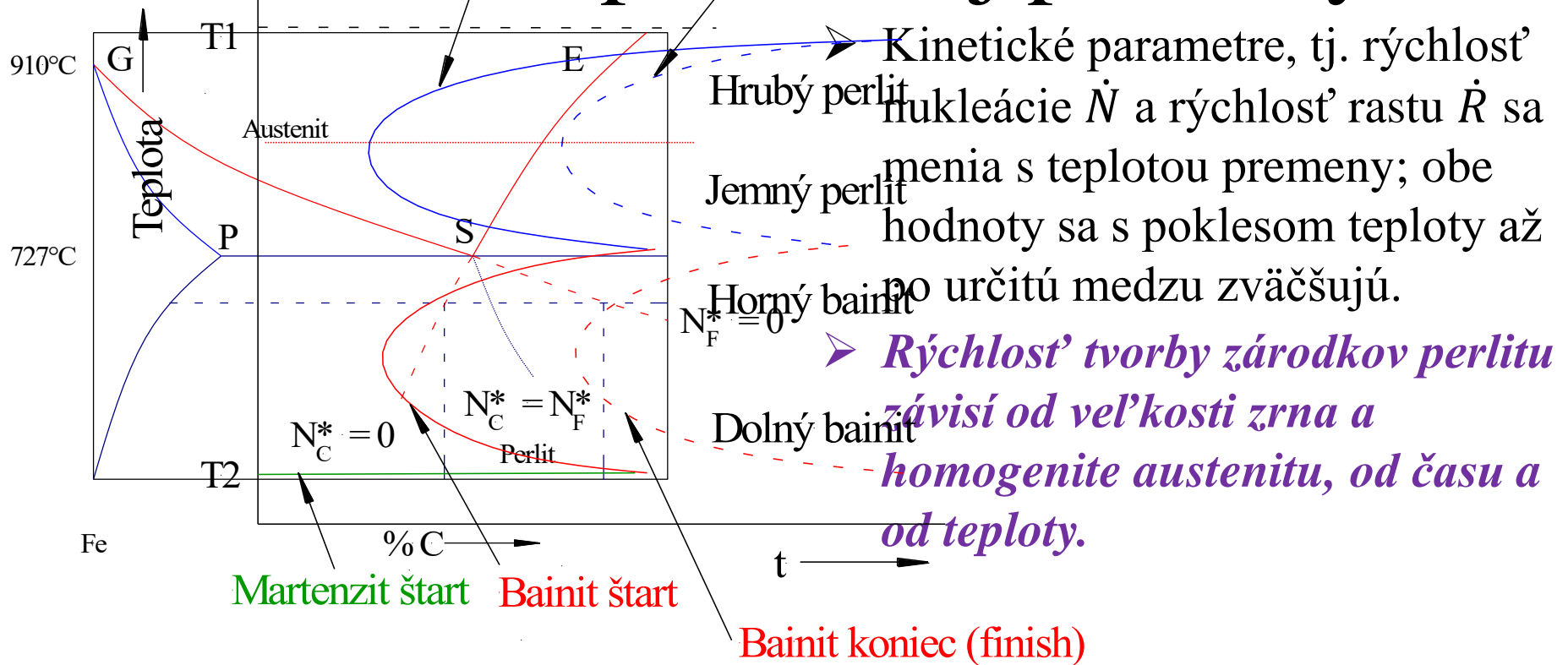




- Reakcia má stacionárnu povahu, chemické zloženie zúčastnených fáz sa v priebehu pochodu nemení.
- Perlitická premena začína heterogénnou nukleáciou dominantnej fázy obyčajne na hraniciach austenitických zŕn, prípadne na fázových rozhraniach austenit ↔ minoritná fáza



# Kinetika perlitickej premeny



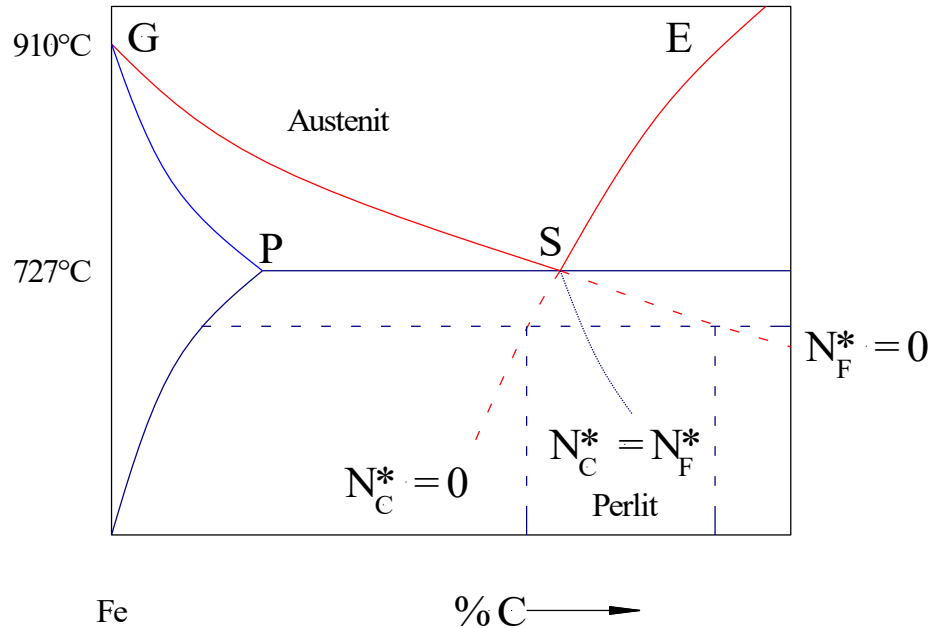
Kinetické parametre, tj. rýchlosť nukleácie  $\dot{N}$  a rýchlosť rastu  $\dot{R}$  sa menia s teplotou premeny; obe hodnoty sa s poklesom teploty až po určitú medzu zväčšujú.

*Rýchlosť tvorby zárodkov perlitu závisí od veľkosti zrna a homogenite austenitu, od času a od teploty.*

- Pri nižších teplotách vznikajú menšie perlitové kolónie a zrná perlitu – austenit sa rozpadá pri súčasnom vzniku jemnejšieho perlitu.
- Rýchlosť nukleácie, ktorá vzrastá s klesajúcou teplotou až k nosu diagramu IRA, je veličinou silno štruktúre závislou
- Najpriaznivejšie podmienky pre nukleáciu perlitu sú v oblastiach s vysokou energiou, kde je najväčšie nahromadenie defektov štruktúry.

# Perlitická premena

Perlit v uhlíkovej oceli je zložený zo striedajúcich sa lamiel feritu a cementitu.



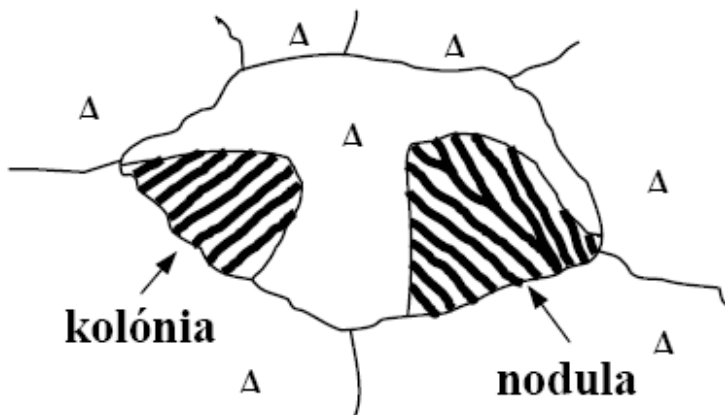
Pravdepodobnosť vzniku zárodku feritu a cementitu

V blízkosti krivky ES- ferit, GS- cementit

Ak je zárodok ferit, v blízkosti zárodku feritu sa musí  $\gamma$  obohatiť o C (rozpustnosť C vo ferite je malá)

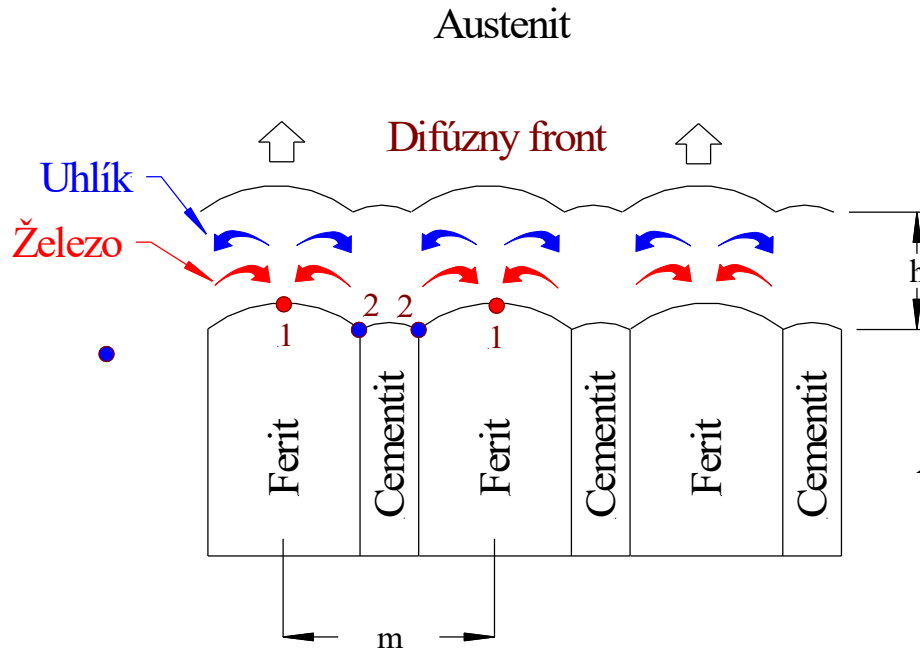
Potom, cementit bude nukleovať v tejto presýtenej oblasti (aktivačná energia je nižšia)

**Dôležitá charakteristika- hrúbka lamiel (medzilamelárna vzdialenosť')**





# Mechanizmus tvorby perlitu



Čelná rýchlosť rastu pri eutektoidnej premene je úmerná difúznemu toku podľa 1. Fickovho zákona a potom rýchlosť nukleácie eutektoidnej reakcie

$$\dot{X}_p \sim J_C^\gamma = -D_C^\gamma \frac{d c_C}{d x} \quad \rightarrow \quad \dot{X}_p \sim D_C^\gamma \frac{c_2 - c_1}{m}$$

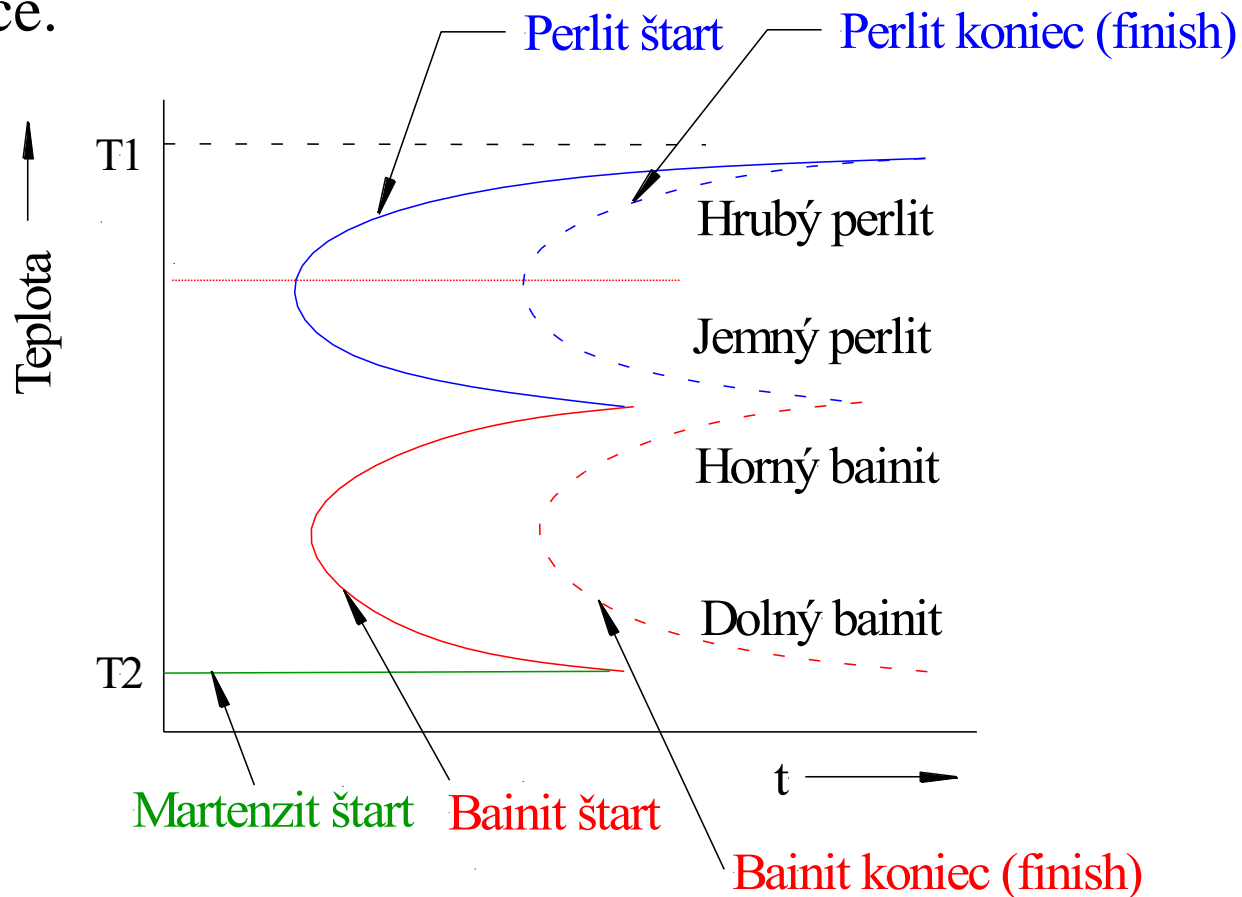
Keďže gradient koncentrácie je funkciou podchladenia  $\Delta T$ , rýchlosť čelného rastu je určená Zenerovou rovnicou:

$$\dot{X}_p \sim \exp\left(-\frac{Q_C^\gamma}{RT}\right) \cdot (\Delta T)^2$$

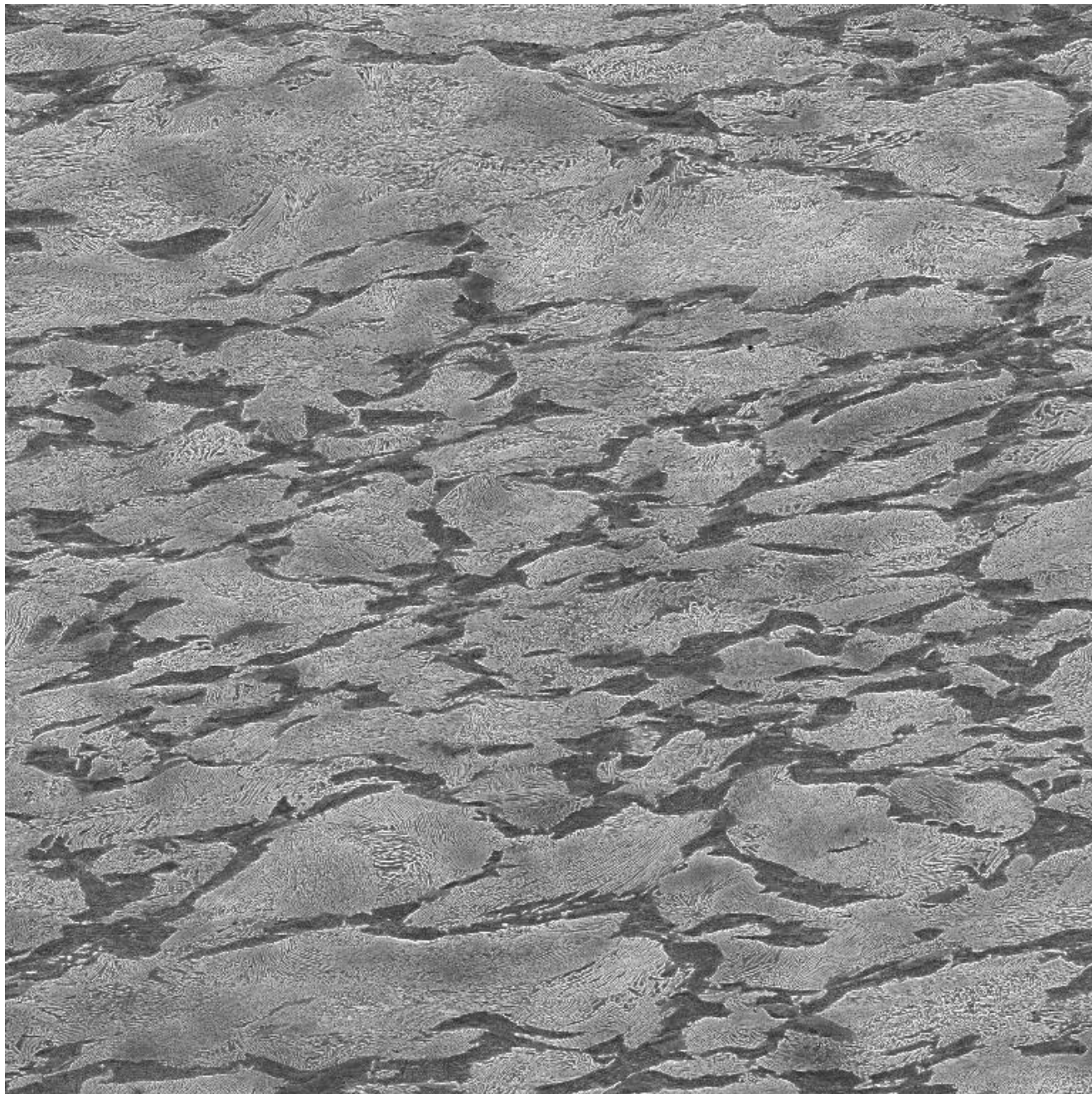
ktorý dobre aproximuje všeobecnú teplotnú závislosť rýchlosti rastu.

Ak rastie perlit pri izotermických podmienkach, je rýchlosť rastu konštantná a rovnaká je aj medzilamelárna vzdialenosť. S klesajúcou teplotou sa vzdialenosti zmenšujú, až sa perlit stáva vo svetelnom mikroskope nerozlíšiteľným. (C-krivka- diagram IRA)

Celkový čas eutektoidnej premeny je kombináciou času potrebného na nukleáciu a času potrebného na to, aby perlitické nodule zaplnili zrná pôvodnej matrice.







SEM HV: 30.00 kV

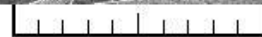
WD: 18.20 mm

SEM MAG: 2.00 kx

MICh

Det: SE Detector

Date(m/d/y): 03/29/19



20  $\mu$ m

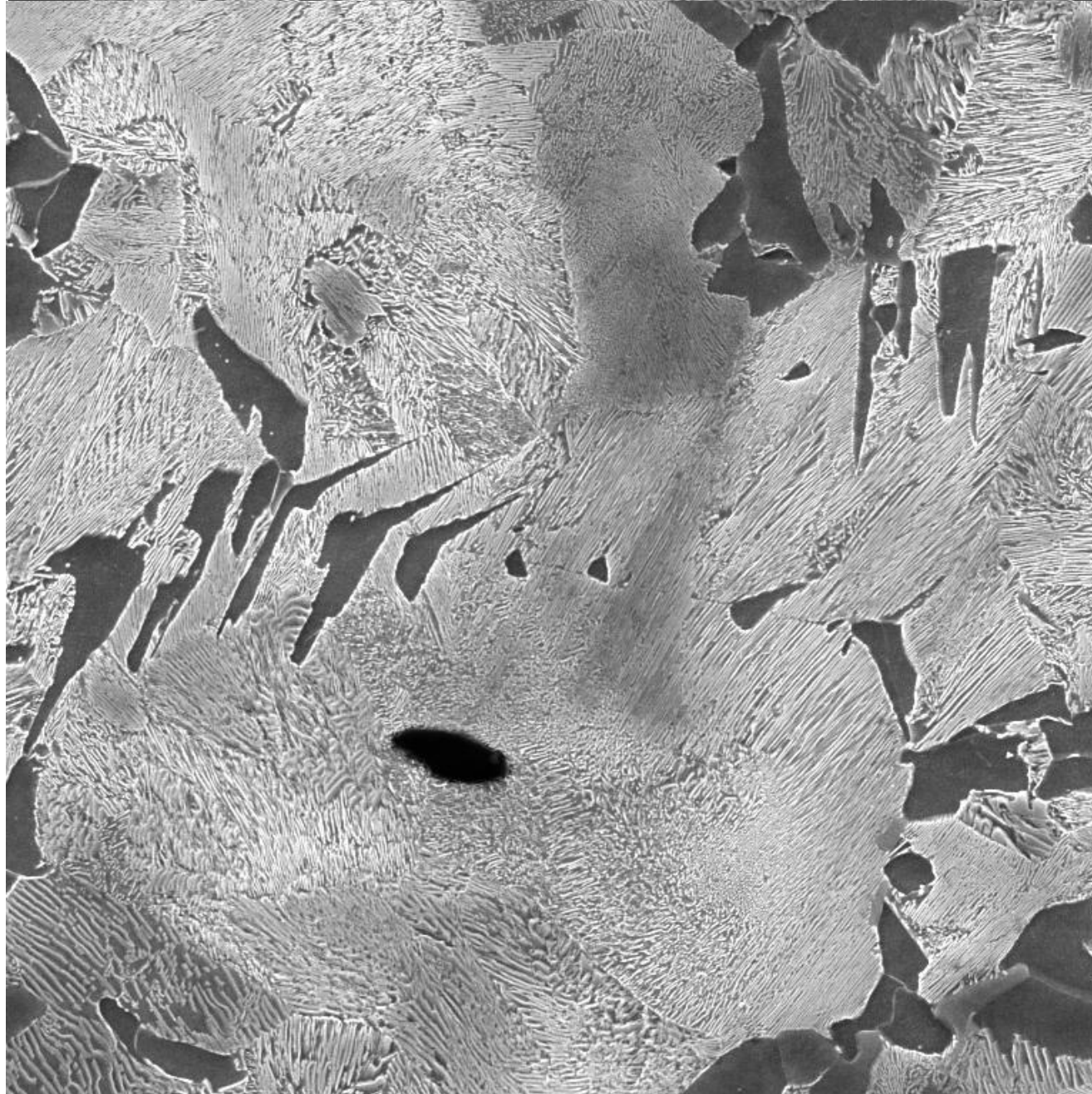
VEGA\\ TESCAN

Digital Microscopy Imaging









SEM HV: 30.00 kV  
WD: 24.88 mm  
SEM MAG: 3.00 kx

MICH  
Det: SE Detector  
Date(m/d/y): 03/29/19

20 μm

VEGA\\ TESCAN

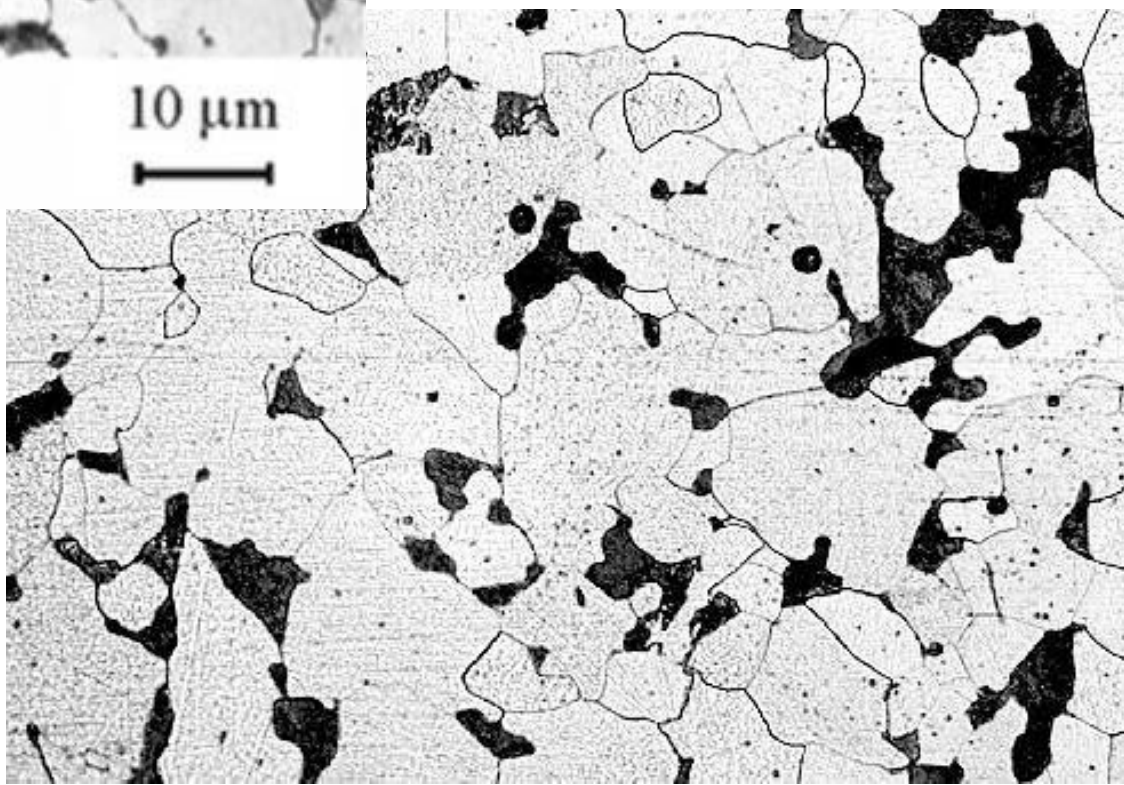
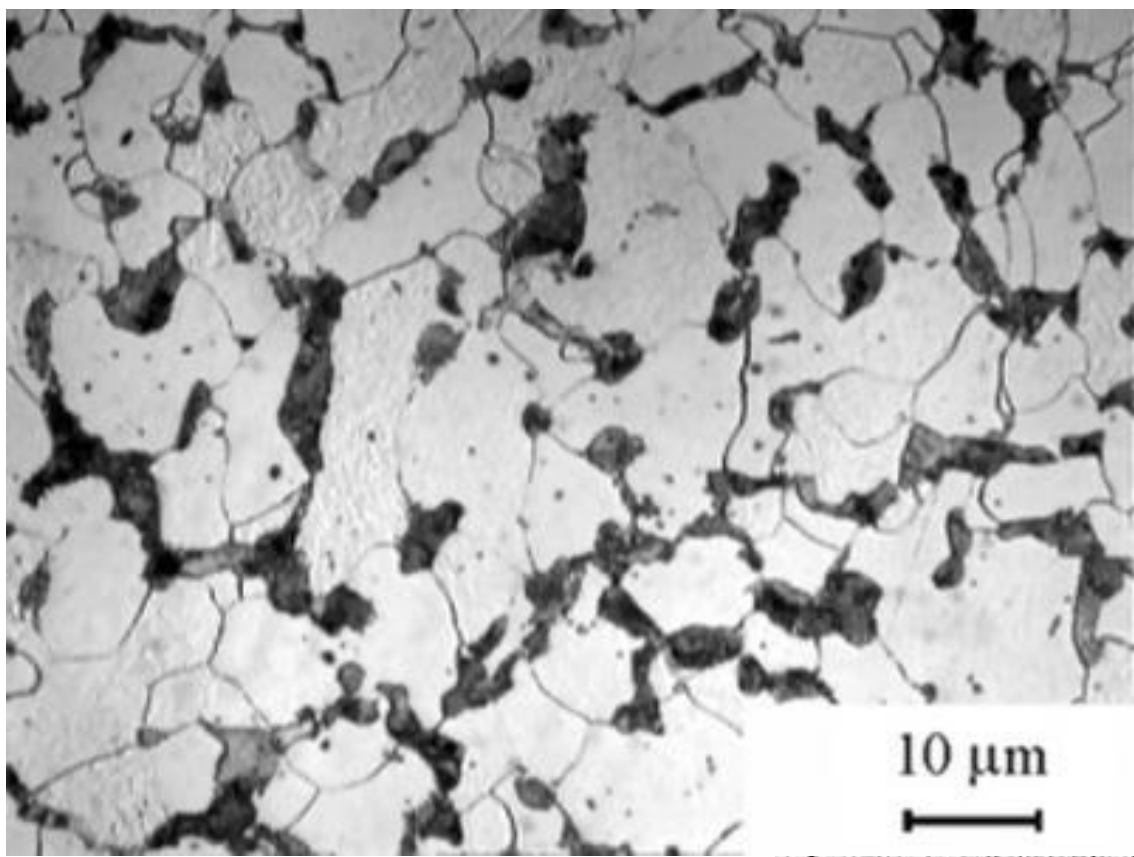
Digital Microscopy Imaging











*V závislosti od veľkosti podchladenia z teploty austenitizácie* môže vznikat' perlit rozdielnych morfológických znakov. Pri *veľmi malom podchladení* pod teplotu Ac1 sa bude perlit vyznačovať *hrubými lamelami feritu a cementitu*. Naopak, pri *podchladení bližiacom sa teplote cca. 550 °C* bude perlit tvorený *veľmi jemnými lamelami feritu a cementitu*. Toto je spôsobené vznikom rozdielneho počtu aktívnych a rastu schopných zárodkov pri malom a veľkom podchladení.

**Ale aj spomalením difúzie železa!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!**

Po vzniku aktívneho zárodku dochádza k vzniku kolónie lamelárneho perlitu *pozdlžným*, tzv. *čelným rastom častíc a bočným rastom*.

*Bočný rast* sa uskutočňuje *opakovanou nukleáciou* nových lamiel feritu a cementitu (napr. po vzniku zárodku  $\text{Fe}_3\text{C}$  je austenit v jeho bezprostrednej blízkosti ochudobnený o uhlík, tým je umožnený vznik zárodkov feritu po oboch stranách  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Bočným rastom zárodku feritu sa austenit v bezprostrednej blízkosti obohacuje o uhlík jeho vytesňovaním z oblasti feritu, čím sa umožňuje vznik nového zárodku  $\text{Fe}_3\text{C}$ , atď'. Ukázalo sa, že vo všetkých lamelách feritu a cementitu jednej perlitickej kolónie je mriežka zložiek rovnako orientovaná.

*Čelný rast kolónie* sa uskutočňuje *rastom lamiel*. Podľa iného názoru na mechanizmus vzniku perlitickej kolónie vyplýva, že bočný rast perlitickej kolónie sa neuskutočňuje opakovanou nukleáciou samostatných lamiel jednotlivých fáz  $\text{Fe}_3\text{C}$  a  $\alpha$  - feritu, ale rozvetvením jedinej častice každej zložky. Podľa tohto názoru je perlitická kolónia zložená z jediného zrna feritu a jediného zrna cementitu, ktoré sú navzájom prerastené.

Dôležitou charakteristikou lamelárneho perlitu je *medzilamelárna vzdialenosť*  $S_0$ , ktorá *predstavuje súčet hrúbky jednej lamely cementitu*. Minimálna hodnota medzilamelárnej vzdialenosti pri určitej teplote je:

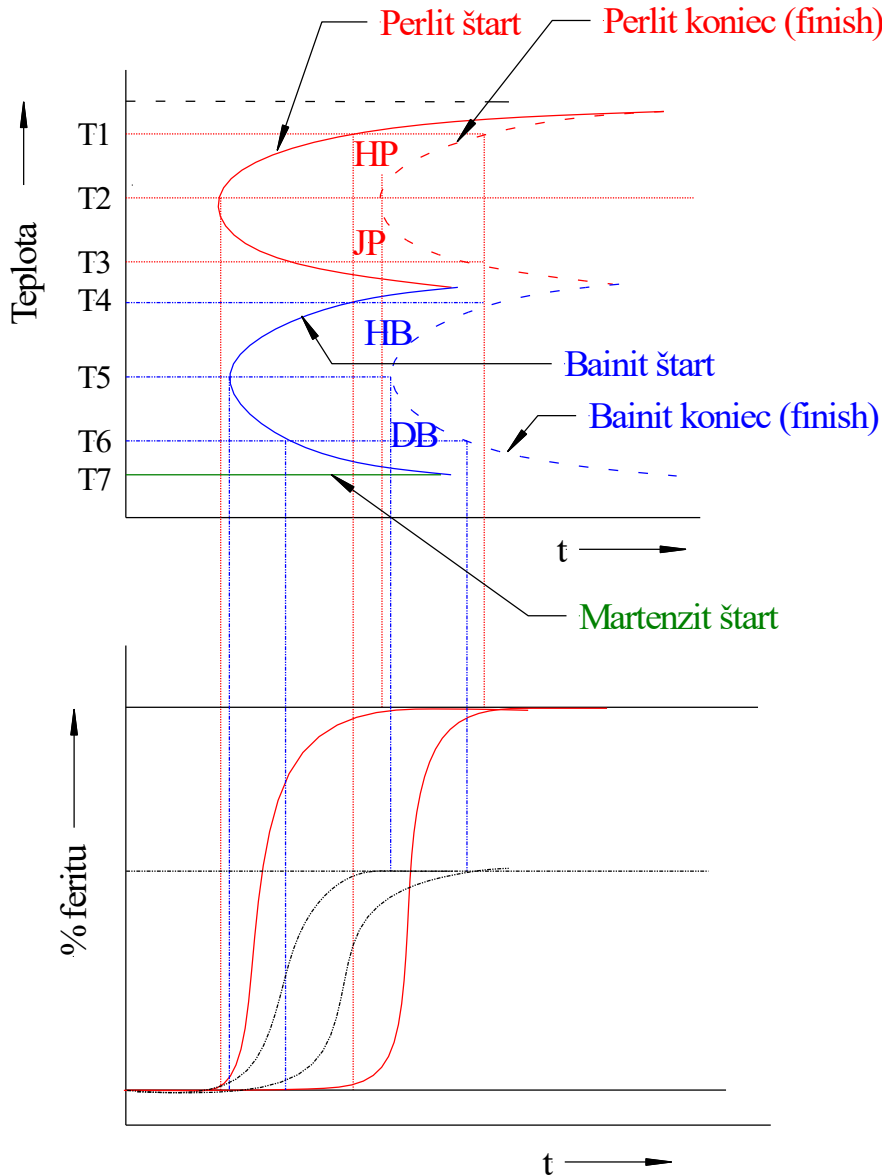
$$S_{0\min} = -\frac{2\sigma}{\Delta G_V}$$

Kde  $\sigma$  je povrchová energia na medzifázovom povrchu ferit – perlit a  $\Delta G_V$  je rozdiel chemickej voľnej entalpie pri fázovej premene  $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ .

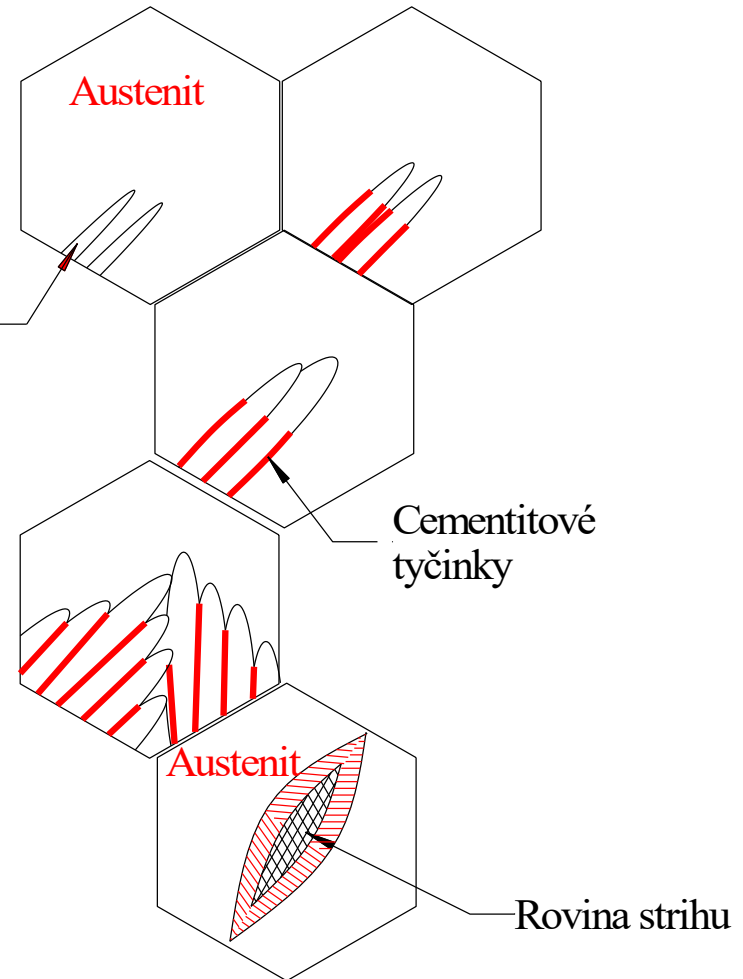
Keď  $\Delta G_V \sim \Delta T$  a  $\sigma$  je konštantné, potom  $S_0$  je úmerné  $\Delta T^{-1}$ . To znamená, že *s rastom podchladenia klesá medzilamelárna vzdialenosť*, t.j. rastie disperzita vzniknutej zmesnej štruktúry.

# Bainitická premena

*Prebieha iba difúzia uhlíka, železo sa transformuje strihom*



Bainitické (feritické) dosky - BF





Podľa transformačnej teploty rozlišujeme:

Podľa transformačnej teploty rozlišujeme:

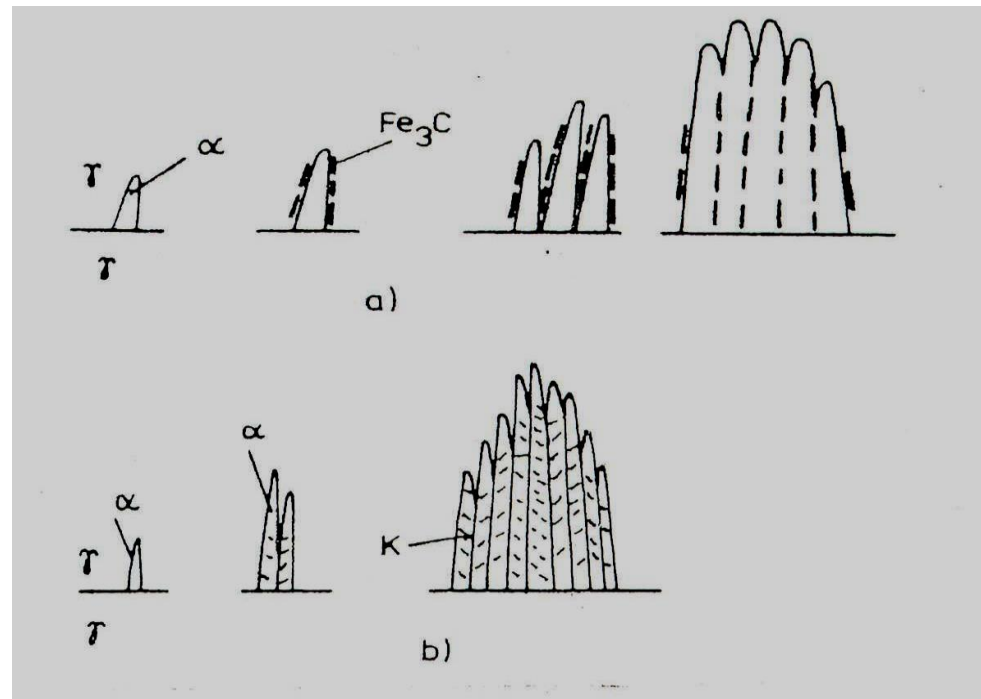
a) vznik horného bainitu

b) vznik dolného bainitu

$\alpha$  – bainitický ferit

$\gamma$  – austenit

K – karbid  $\epsilon$ , príp. cementit

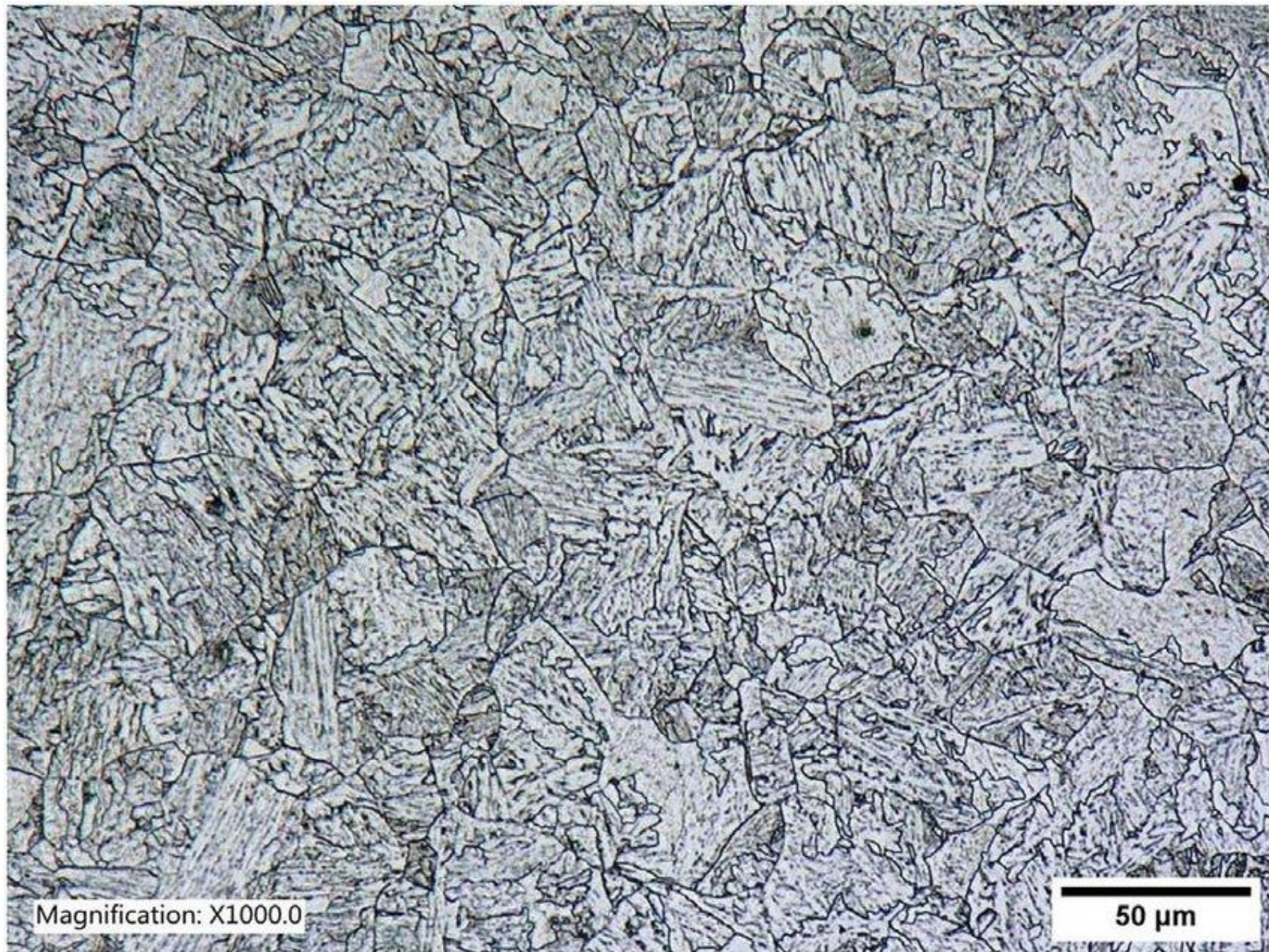


**Horný bainit** – vzniká pri teplotách 350 - 500°C, jeho štruktúru tvoria zväzky hrubších ihlíc bainitického feritu s pozdĺžne usporiadanými časticami cementitu, ktoré sú vylúčené hlavne na povrchu ihlíc. Cementit precipituje na hranici ferit-austenit (difúzia uhlíka a substitučných prvkov)

**Dolný bainit** vzniká pri teplotách nižších (pod 350°C) a je tvorený tenkými doskami bainitického feritu viac presýteného uhlíkom, takže k precipitácii karbidov dochádza prevažne vo vnútri dosiek. Karbidy nukleujú vo vnútri v presýtenom ferite (iba difúzia uhlíka). Je jemnejší ako horný bainit a vlastnosťami sa blíži vlastnostiam martenzitu. Má najvyššie hodnoty mechanických vlastností.

- Štruktúra bainitu sa výrazne mení s teplotou premeny a s chemickým zložením austenitu
- Pri poklese teploty sa zmenšuje hrúbka častíc bainitického feritu, vzrastá hustota dislokácií aj koncentrácia uhlíka v tuhom roztoku a zjemňuje sa disperzia karbidov; pevnosť a tvrdosť bainitu sa zvyšuje. Nedosahuje sa tvrdosť martenzitickej štruktúry, avšak húževnatosť je podstatne vyššia. V porovnaní s lamelárnymi štruktúrami perlitického typu sú pevnostné vlastnosti bainitu vyššie. Najvyššie hodnoty mechanických vlastností má bainit vylúčený pri nižších teplotách.

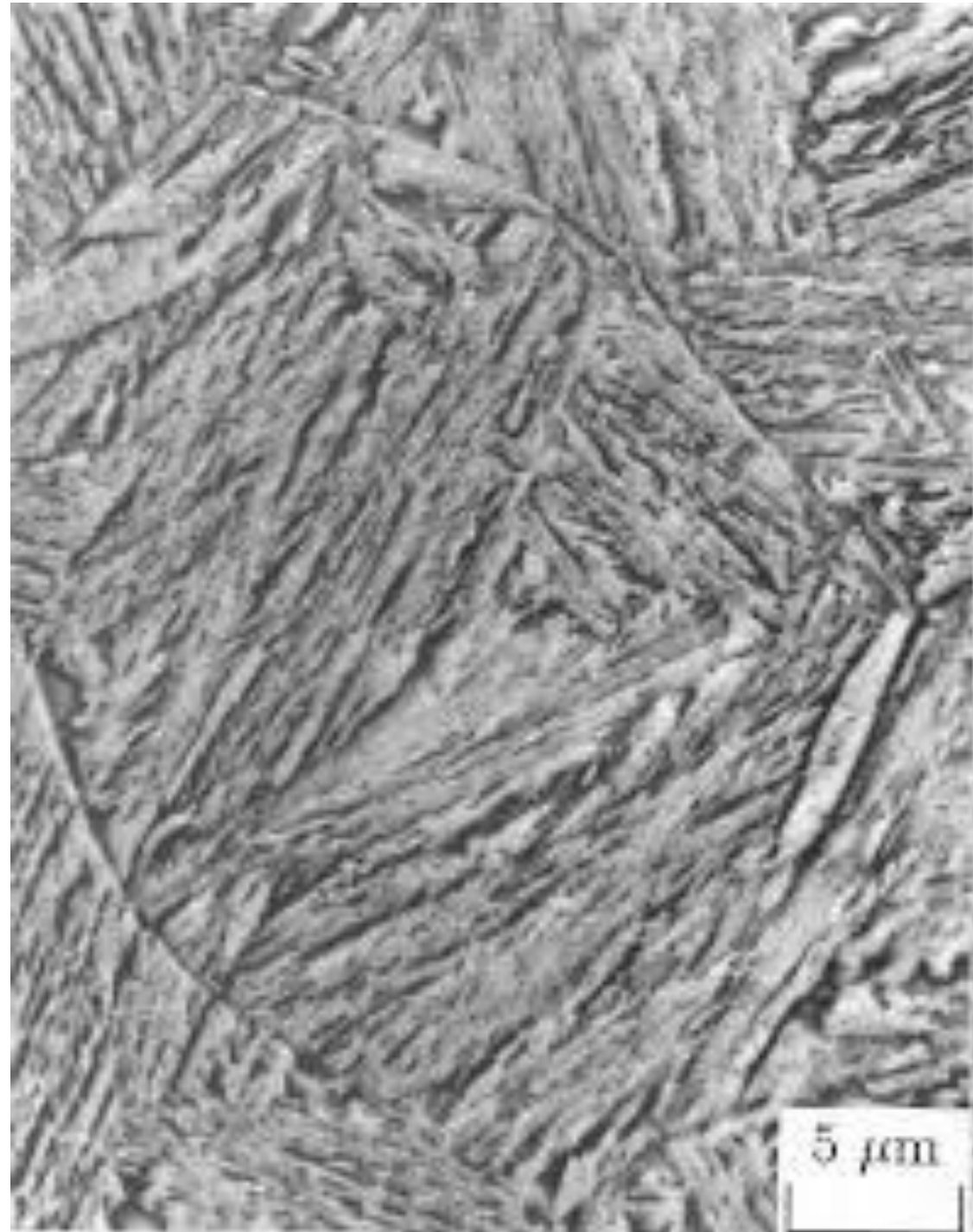


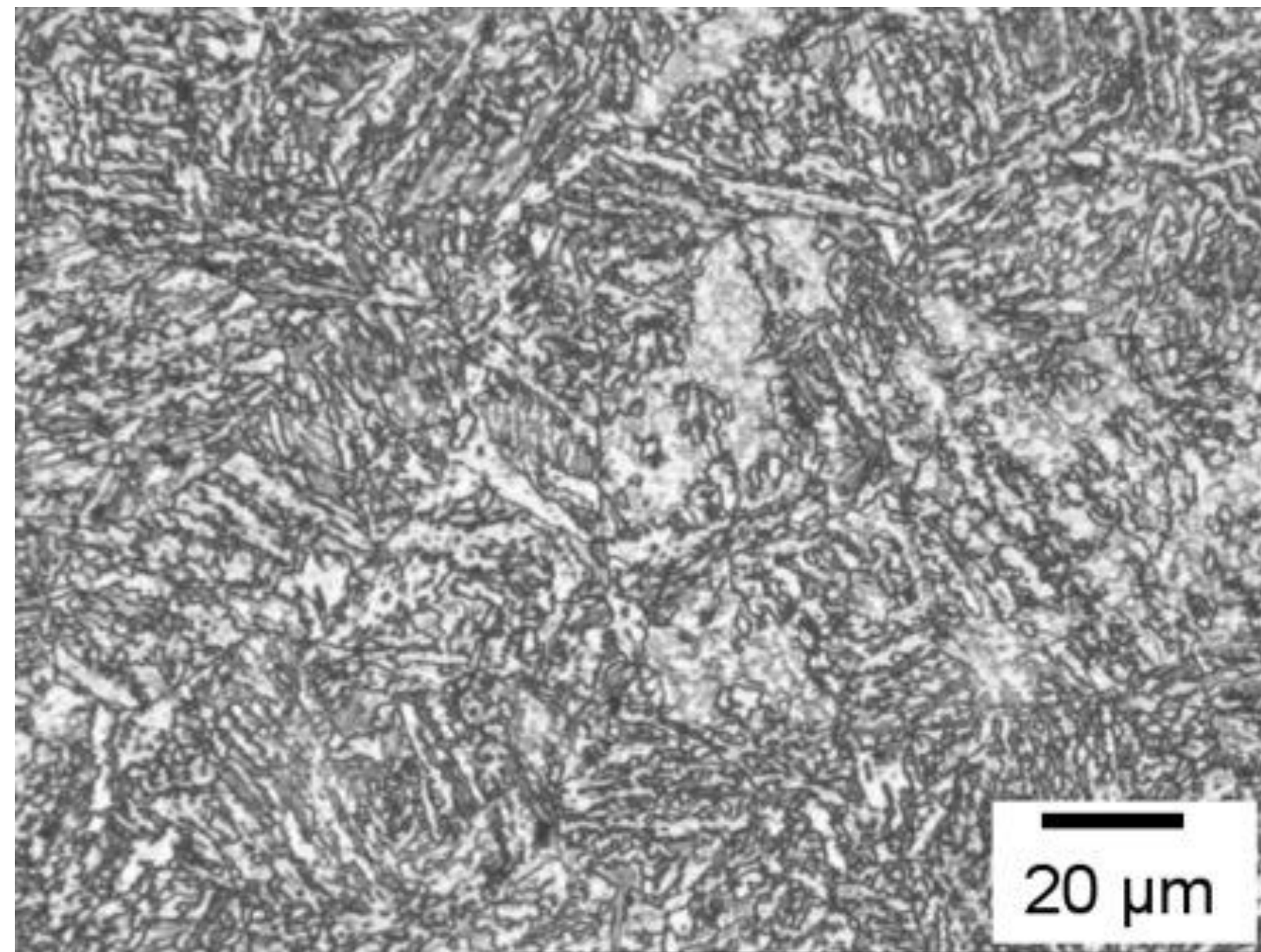


Magnification: X1000.0

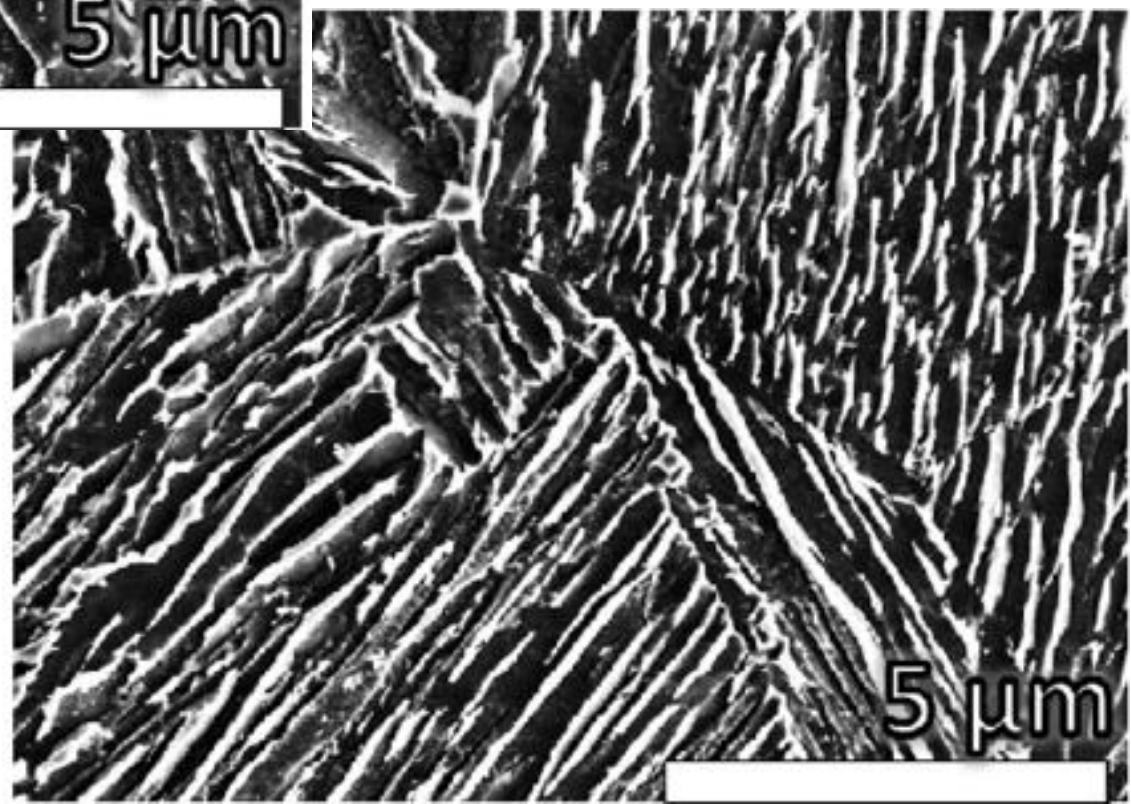
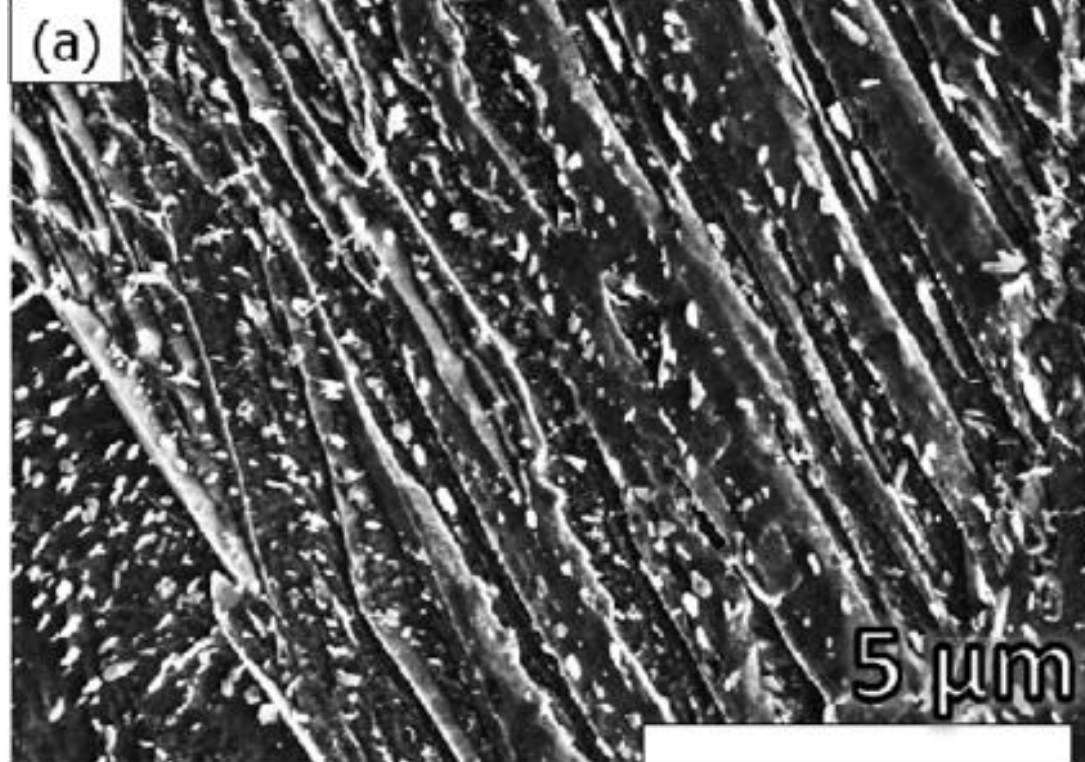
50  $\mu\text{m}$

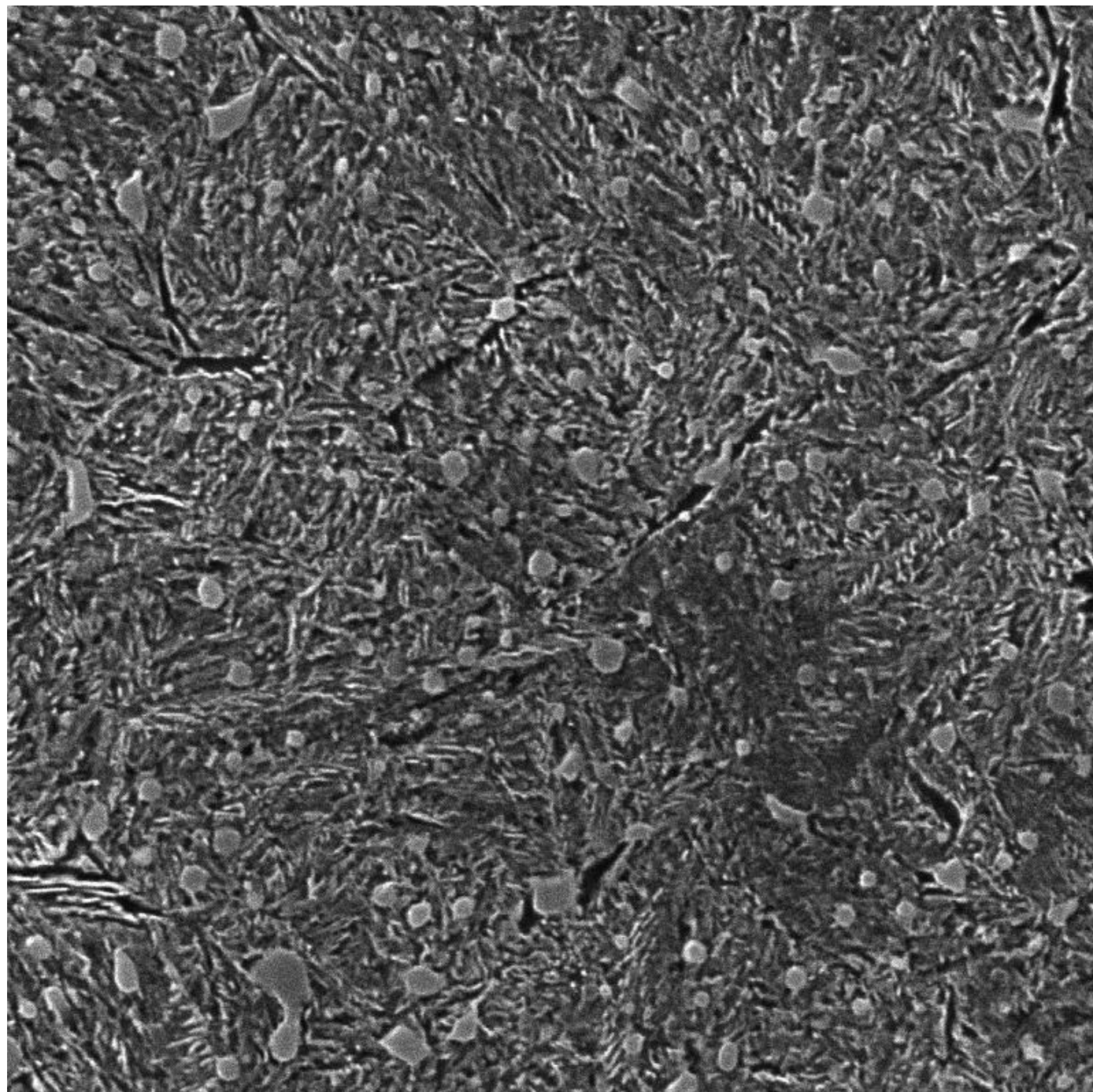






(a)





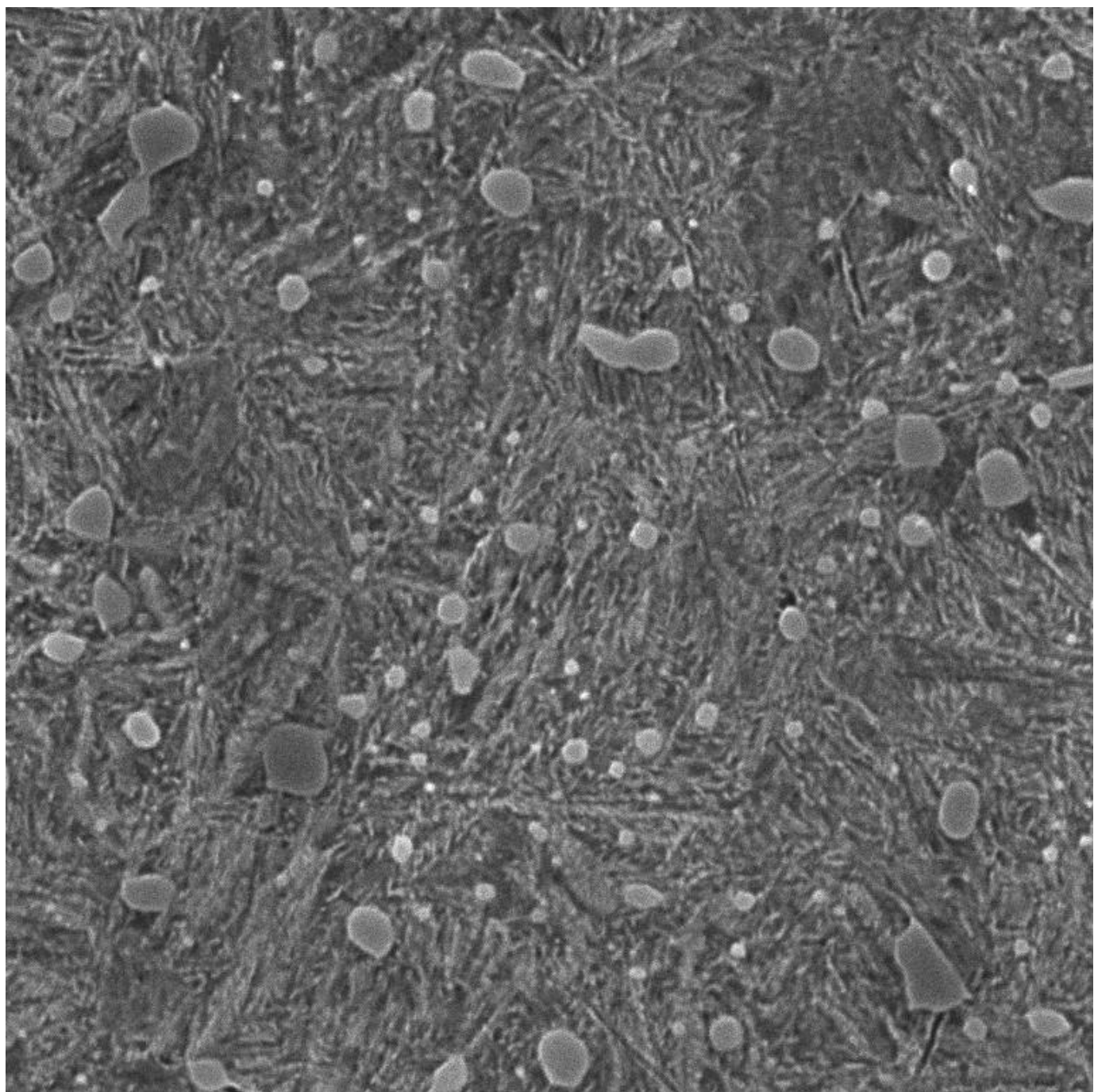
SEM HV: 30.00 kV

chmkmi



VEGA\\ TESCAN





SEM HV: 30.00 kV

chmkmi



VEGA\\ TESCAN

View field: 27.14  $\mu$ m

Det: SE Detector

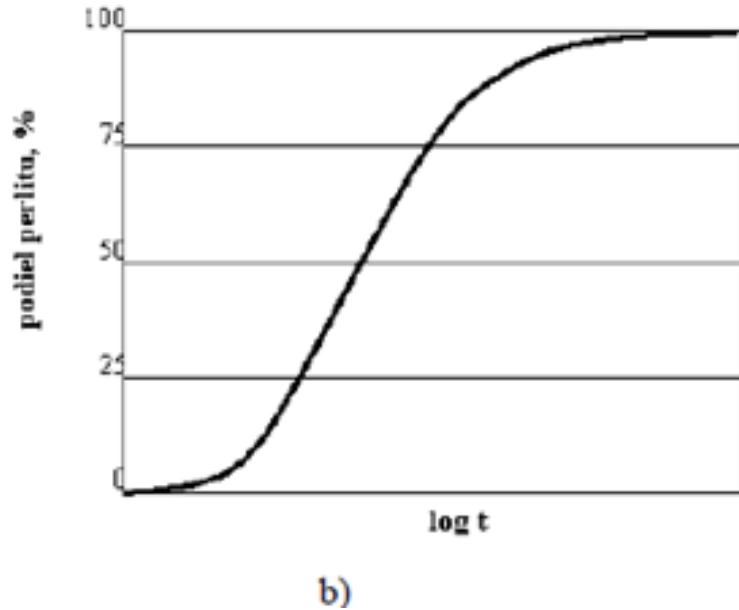
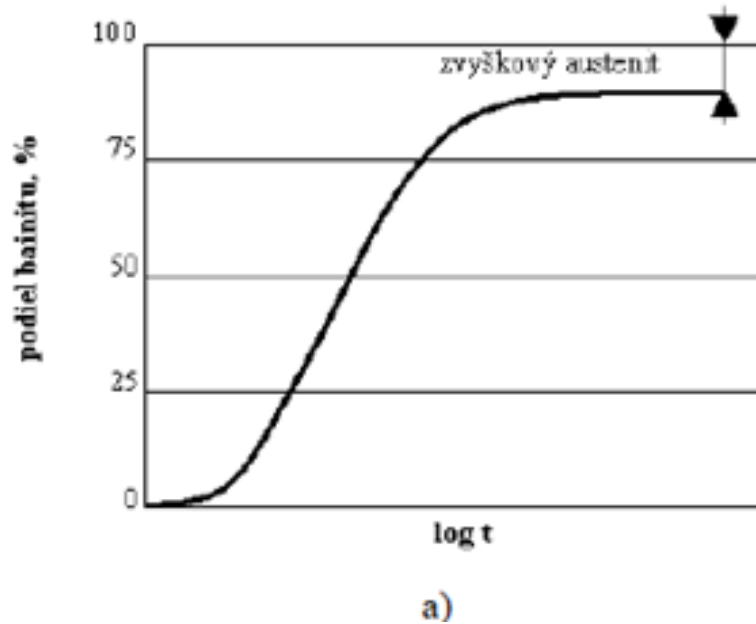
5  $\mu$ m



# Prehľad

Teplota rozpadu	$A_1 \div 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$500 \text{ }^\circ\text{C} \div 250 \text{ }^\circ\text{C}$	pod $250 \text{ }^\circ\text{C}$
Samodifúzia Fe	prebieha	neprebieha	neprebieha
Mechanizmus premeny $\text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\alpha$	difúzny	bezdifúzny (šmykový)	bezdifúzny (šmykový)
Difúzia uhlíka	prebieha	prebieha	neprebieha
Rovnica premeny	$\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$	$\gamma \rightarrow \alpha_{\text{pres.}} + \text{Fe}_x\text{C}$	$\gamma \rightarrow \alpha_{\text{pres.}}$
Názov premeny	PERLITICKÁ	BAINITICKÁ	MARTENZITICKÁ
Štruktúra	perlit	bainit	martenzit
Popis štruktúry	lamelárna zmes feritu a cementitu	zmes presýteného bainitického feritu a karbidov + zvyškový austenit	presýtený tetragonálny tuhý roztok C v $\text{Fe}_\alpha$ (ihlicovitá štruktúra) + zvyškový austenit

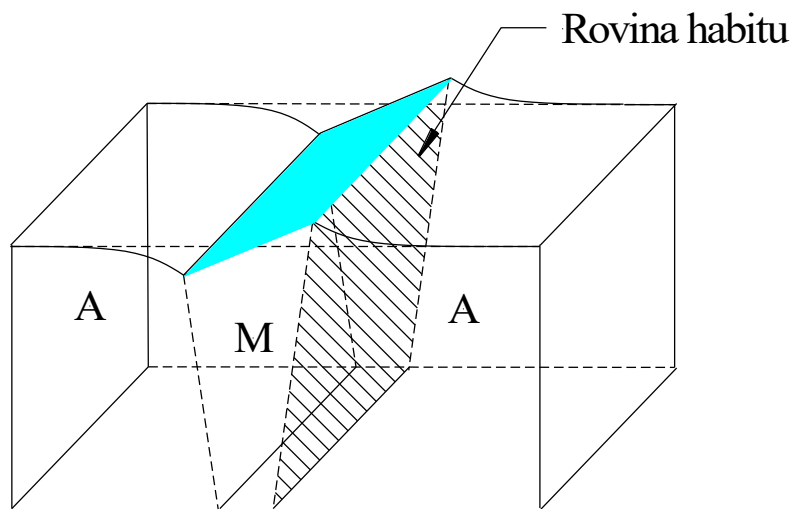
## Izotermická premena: a) bainitická b) perlitická



Podiel nepremeného austenitu v štruktúre je závislý od teploty premeny, rýchlosti ochladzovania a chemického zloženia materiálu. Všeobecne platí, že s klesajúcou teplotou premeny klesá množstvo nepremeného austenitu.

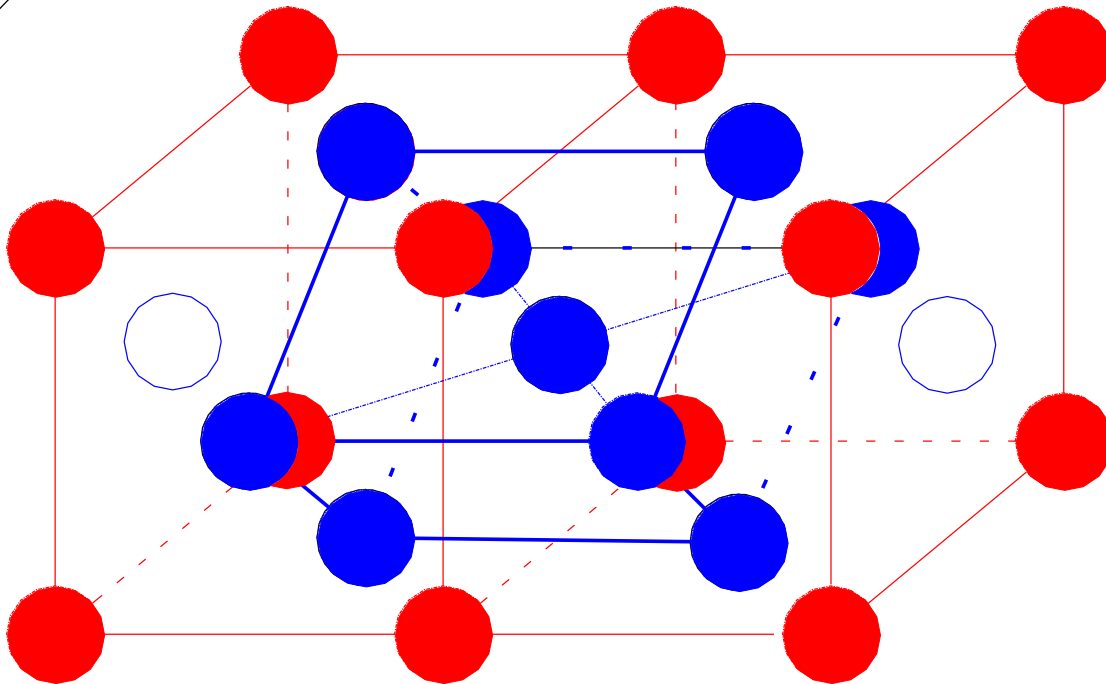
# Martenzitická premena

*Difúzia železa aj uhlíka je zabrzdená, premena prebieha iba strihom*



*Rovina habitu – premiestnenie atómov v tejto rovine je rovné nule – je to hranica medzi austenitom a martenzitom*

*Bainov model*

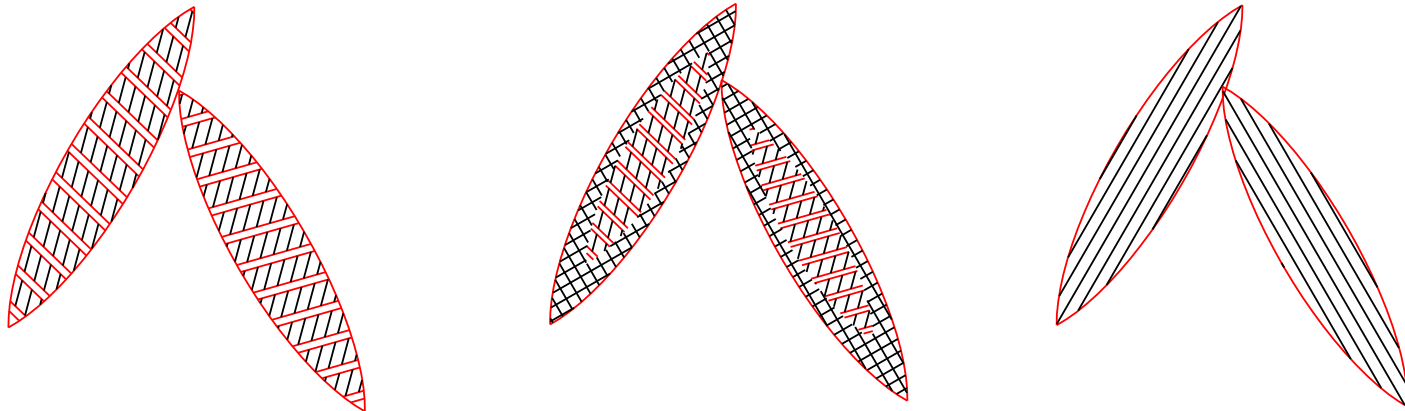


Orientačný vzťah potvrdený pre uhlíkové ocele s 0,5 až 1,1 hm.% C má tvar

$$(1 \bar{1} 1)_{\gamma} \parallel (101)_{\alpha_m} \quad \text{a} \quad [\bar{1} 01]_{\gamma} \parallel [\bar{1} \bar{1} 1]_{\alpha_m}$$

Pre ocele s obsahom nad 1,5 hm.% C a pre zliatiny Fe-Ni získal Nishiyama orientačné vzťahy

$$(1 \bar{1} 1)_{\gamma} \parallel (101)_{\alpha_m} \quad \text{a} \quad [\bar{1} 12]_{\gamma} \parallel [\bar{1} 01]_{\alpha_m}$$



Príklady štruktúry martenzitu

# Morfológia martenzitickej štruktúry môže byť klasifikovaná do nasledovných skupín:

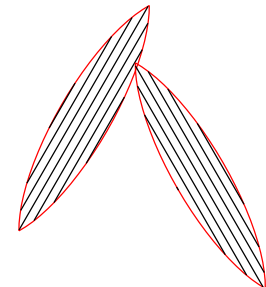
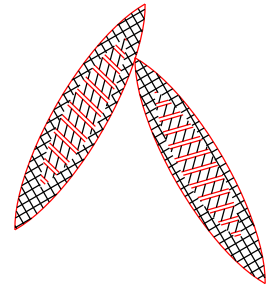
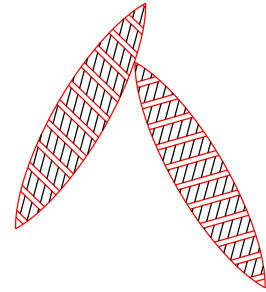
Doskovité dvojčatové kryštály, kde je stredná habitová rovina  $\{259\}_\gamma$  rovnobežná s rovinou „*stredného rebra*“.

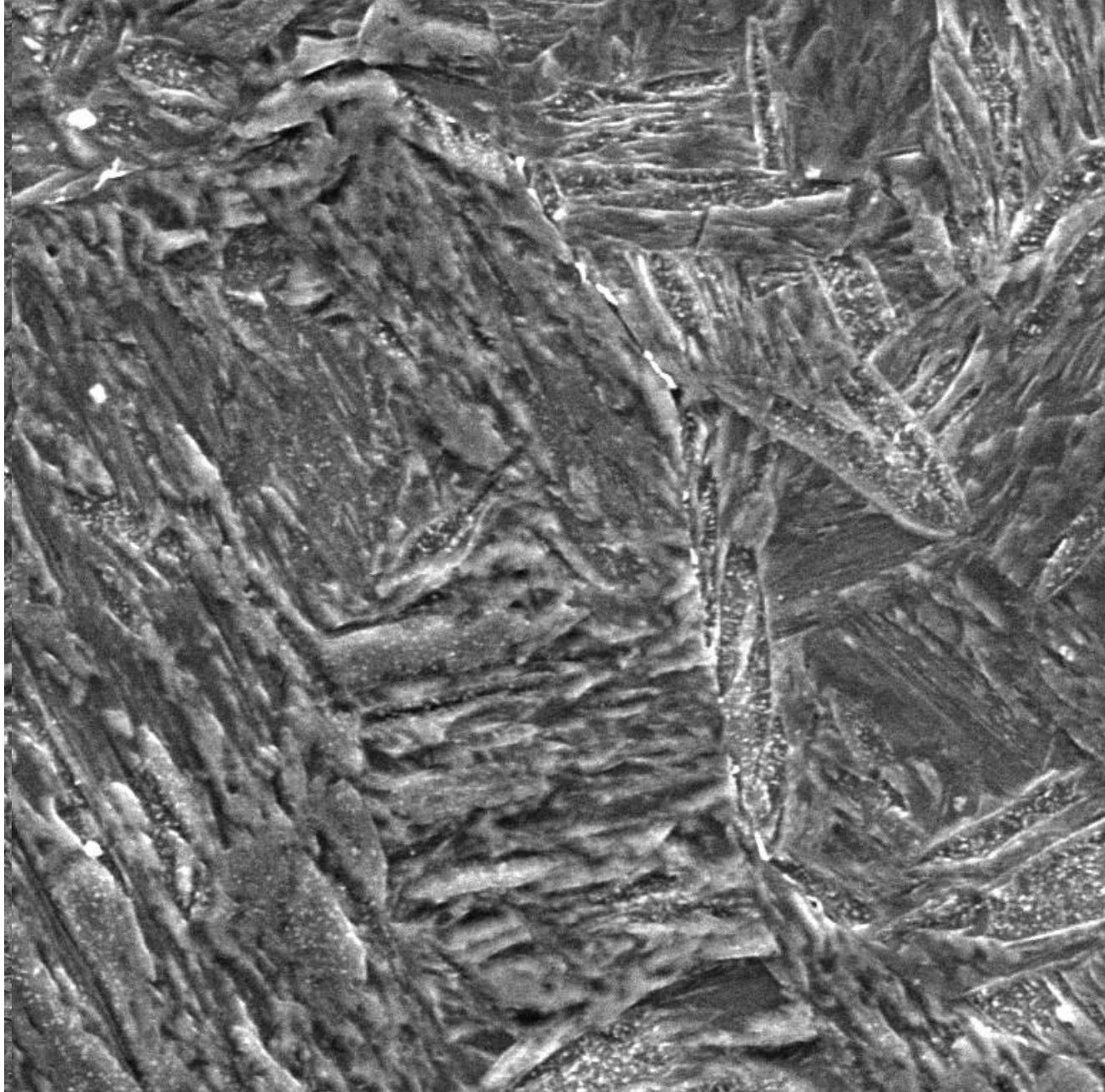
Doskovité čiastočne dvojčatové kryštály so „stredným rebrom“  $\{259\}_\gamma$  nerovnobežným s hranicami, ktorých rovina je blízka  $\{112\}_\gamma$ . Kryštály sa zokupujú do radov.

Kryštály tyčkového tvaru s habitom blízky  $\{111\}_\gamma$  tvoria kolónie, ktorými prechádzajú dvojčatové „stredné rebrá“ a nie sú rovnobežné s hranicami tyčiek. V kolónii sú tyčky rovnobežné a majú rovnaké alebo dvojaké orientačné vzťahy

Kryštály tyčkového tvaru s habitom  $\{111\}_\gamma$  bez dvojčat rovnakej alebo dvojčatovo prepojenej orientácie.

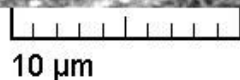
Kryštály tyčkového tvaru vo vnútri dosiek – martenzitu s hexagonálnou tesne usporiadanou mriežkou rozdielne rozložené





SEM HV: 30.00 kV  
View field: 57.45  $\mu\text{m}$   
[Date(m/d/y): 03/12/10

WD: 24.55 mm  
Det: SE Detector  
pp



VEGA\\ TESCAN

Digital Microscopy Imaging

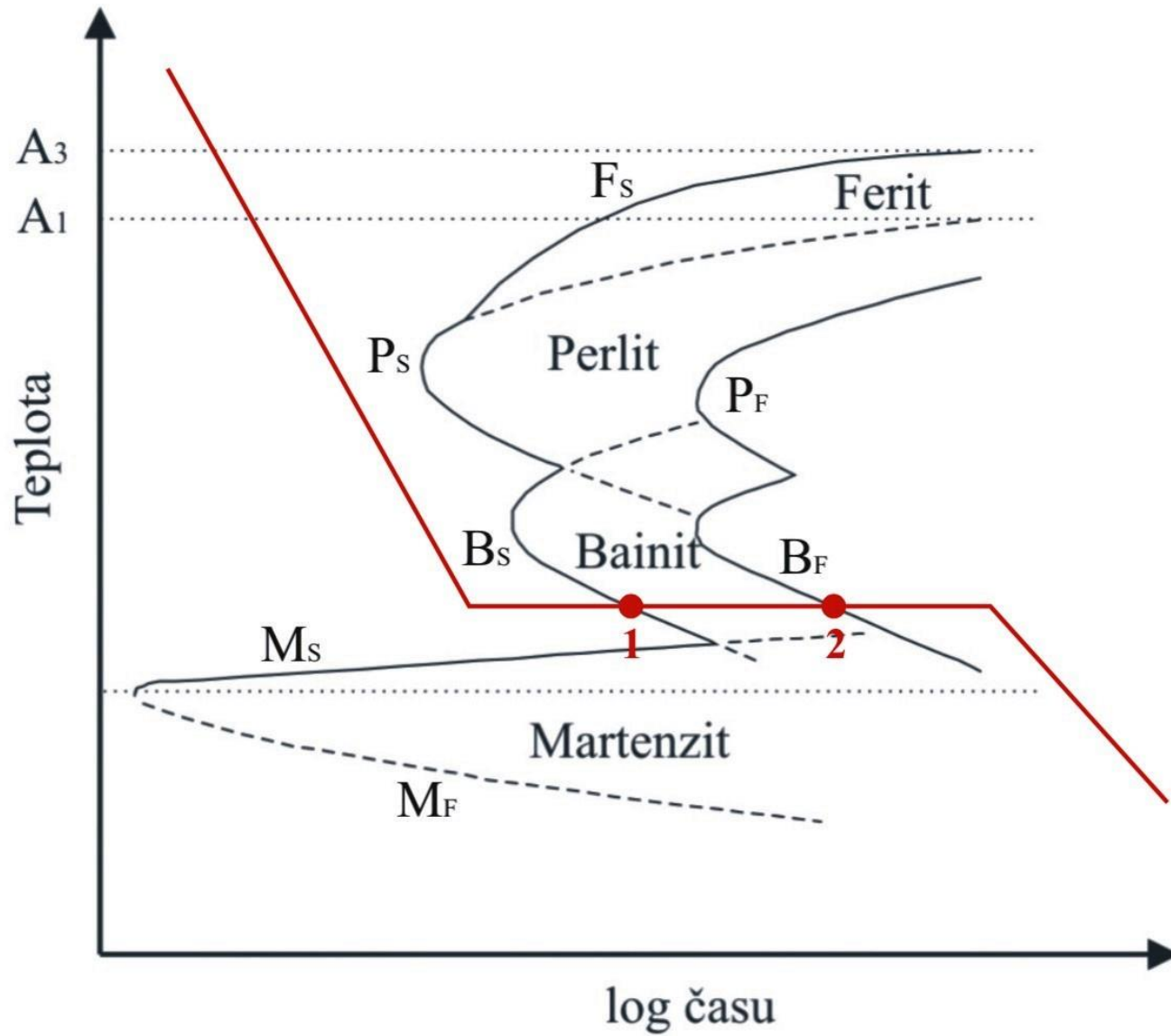




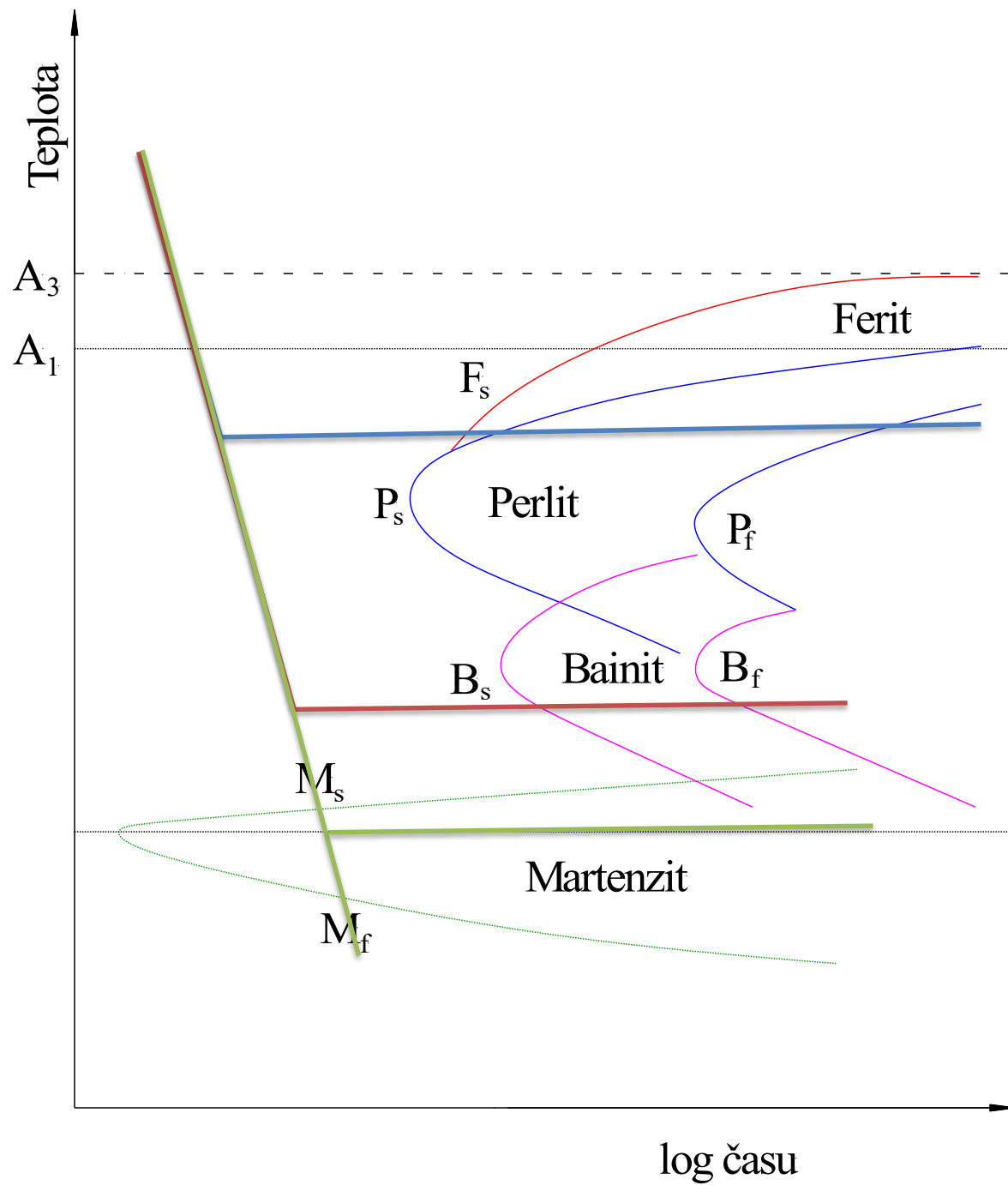
# Diagramy rozpadu austenitu

- Znázorňujú teplotnú a časovú závislosť priebehu premeny austenitu
- Pri stálej teplote rozpadu austenitu  
**izotermický rozpad austenitu (IRA)**
- Pri rôznych rýchlostiach ochladzovania **anizotermický rozpad austenitu (ARA)**
- Konkrétny transformačný diagram **platí len pre určitú ocel'**

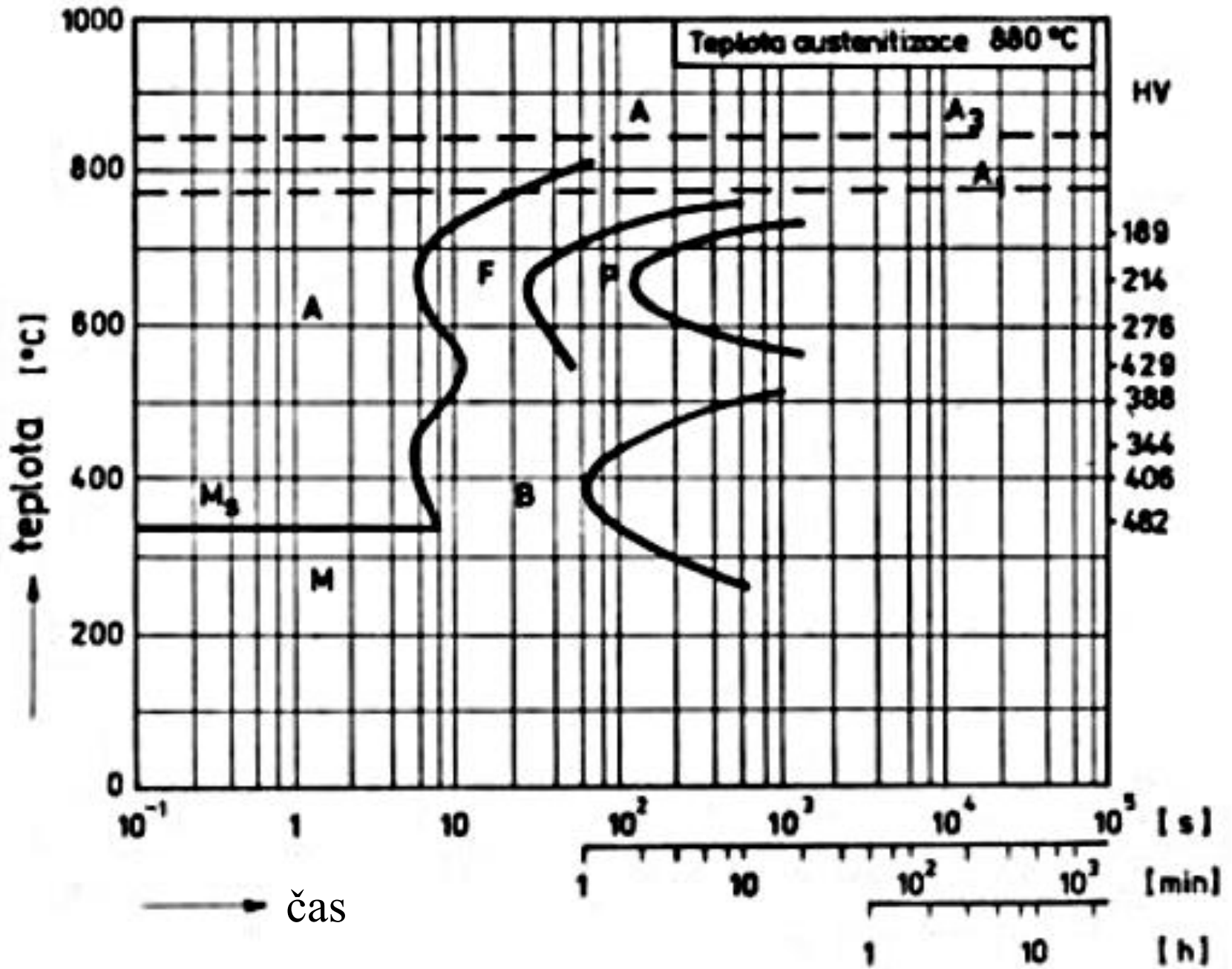
# IRA diagram







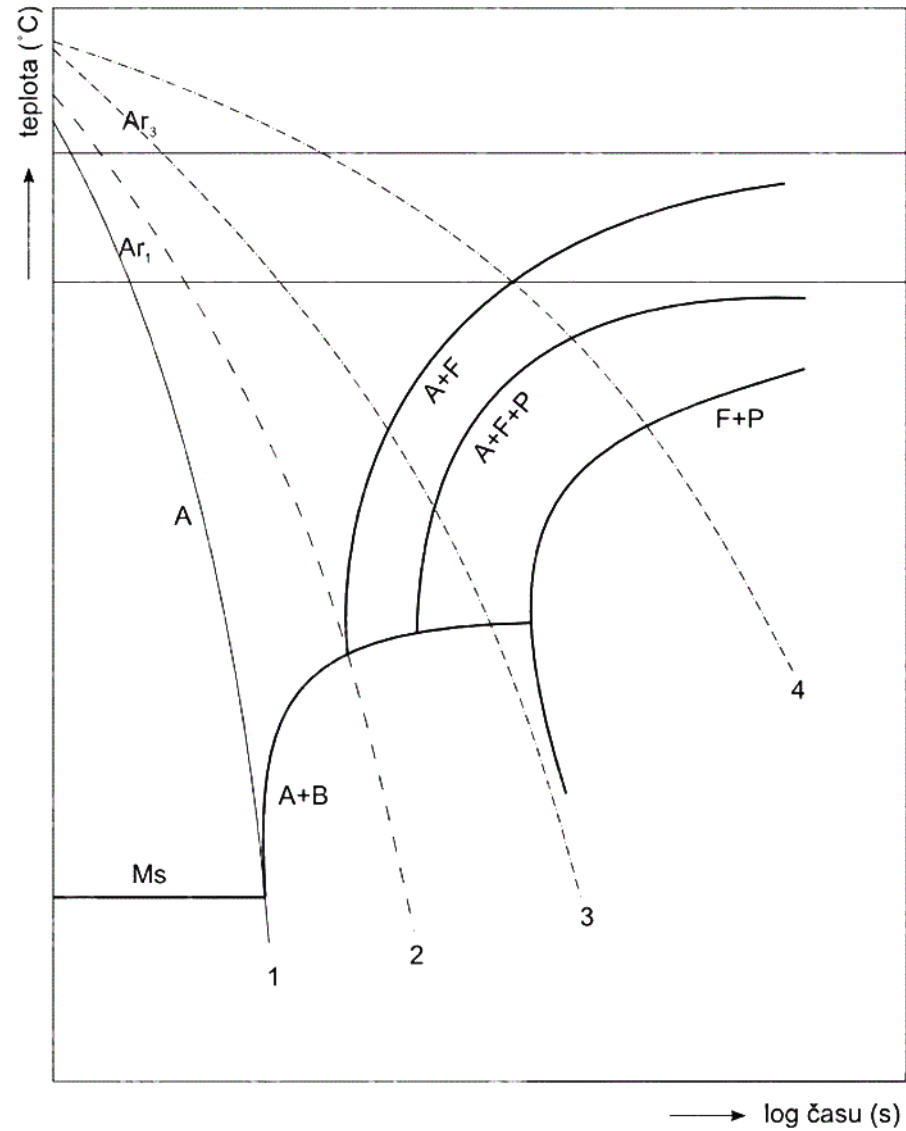
STN 41 4331



# ARA diagramy

- Krivky začiatku a konca premeny získané pri plynulom ochladzovaní
- Vplyv prísadových prvkov na tvar ARA diagramu je podobný ako u IRA
- Prísadové prvky posúvajú krivky k nižším teplotám a dlhším časom
- Diagramy ARA je nutné sledovať v smere jednotlivých kriviek ochladzovania

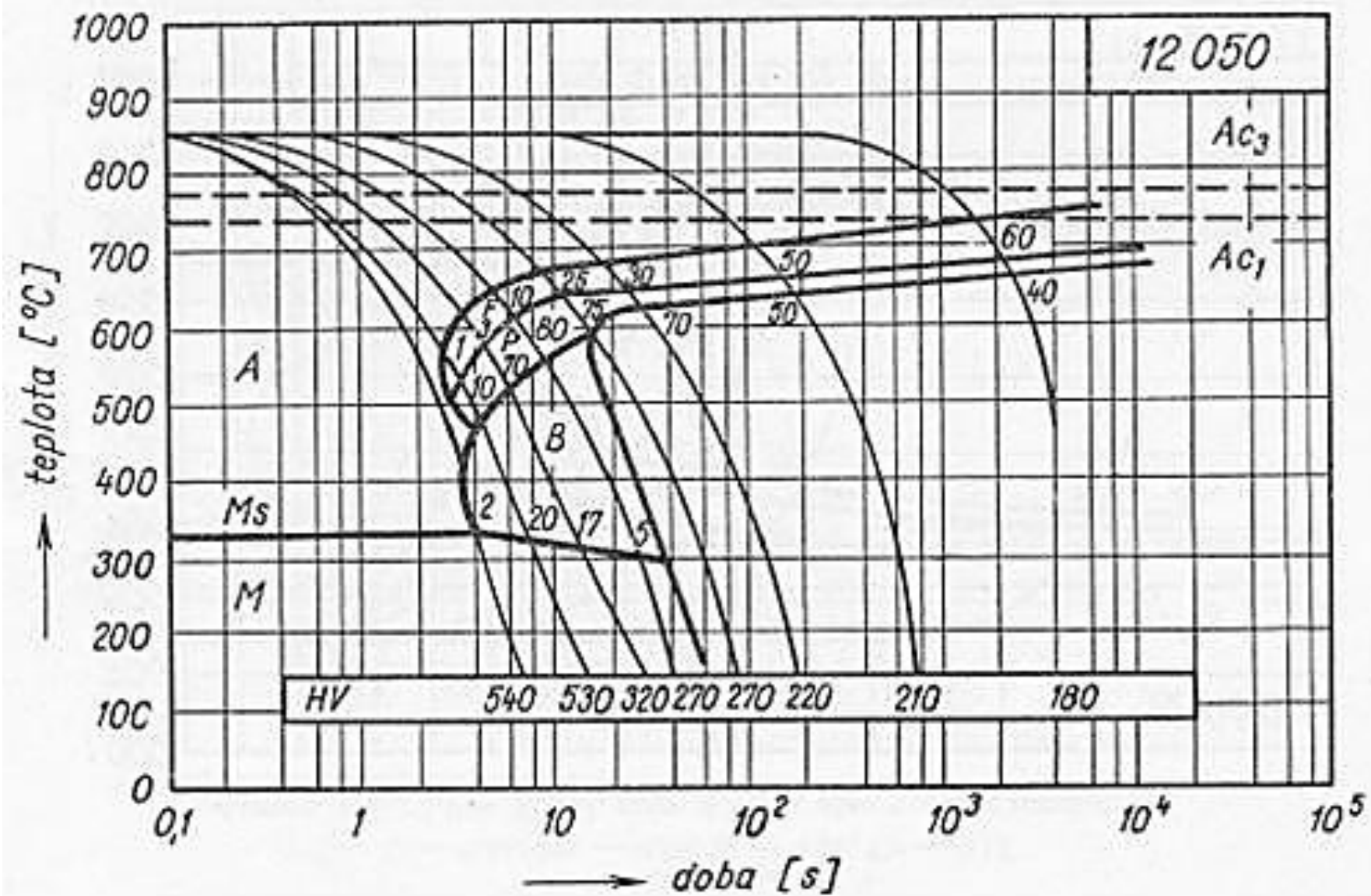
# ARA diagram



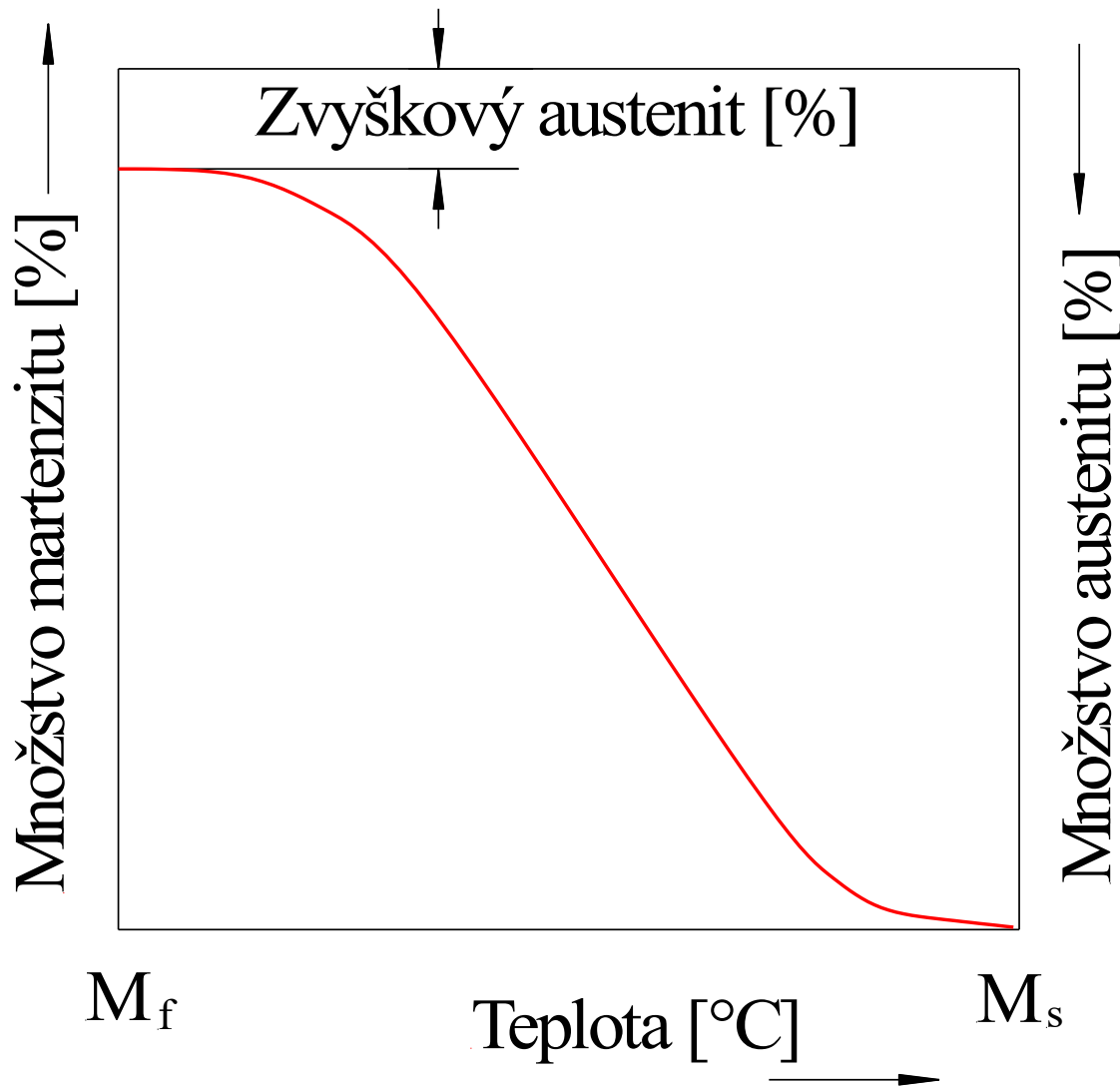


C — 0,44; Mn — 0,66; Si — 0,22; Cr — 0,15; V — 0,02

Austen. tepl.: 880 °C Vel. zrna: 9 Vých. stav vzorku: normal. žih.



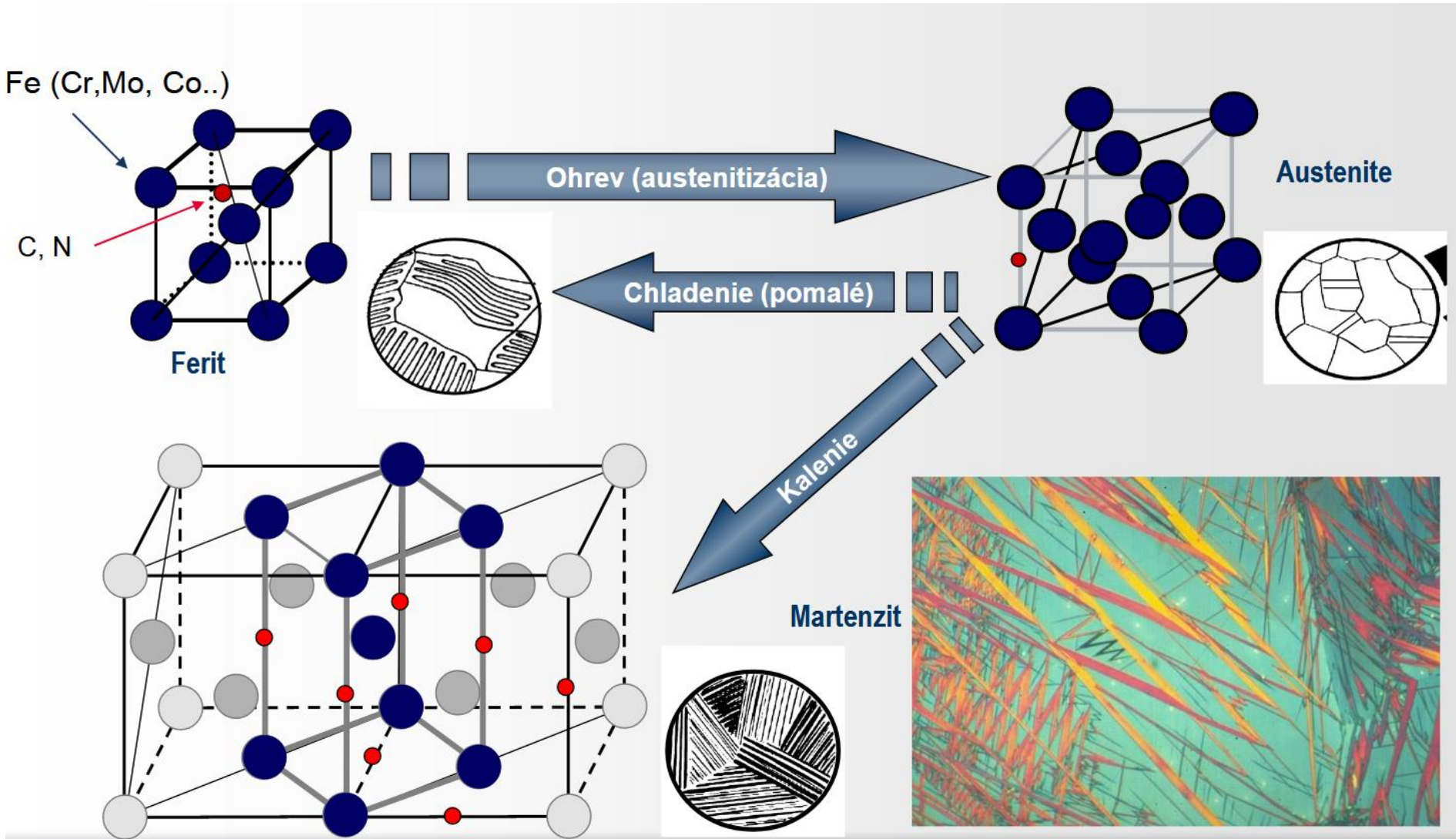
- V okolí rastúceho martenzitu vzniká napät'ové pole, ktoré bráni ďalšej premene
- Netrasformovaná fáza sa volá zvyškový austenit



# Vlastnosti martenzitu

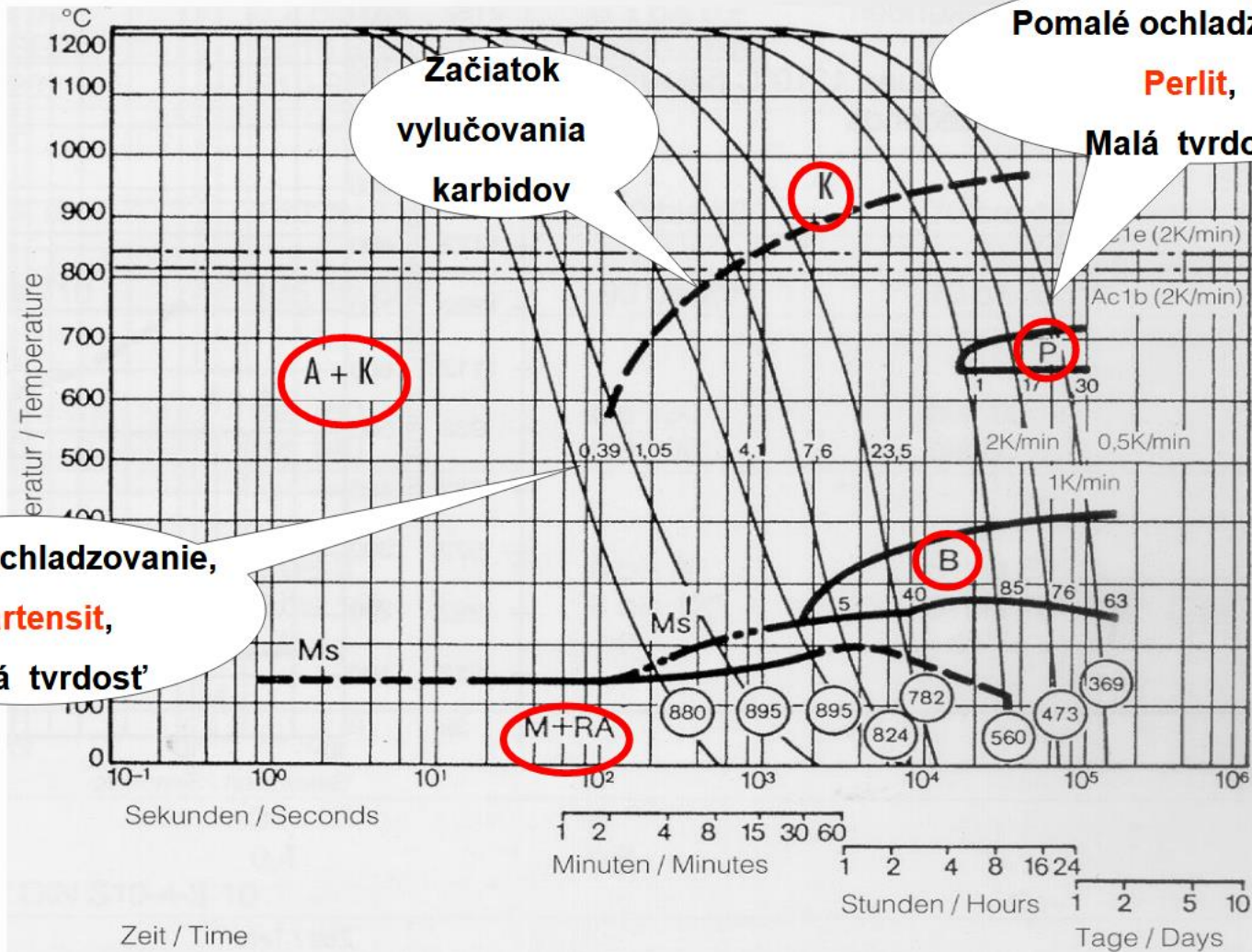
- Martenzit je tvrdší ako pôvodná fáza
- Tvrdosť je daná spevňujúcimi mechanizmami:
- Spevnenie tuhého roztoku
- Nepohyblivé dislokácie
- Spevnenie vyvolané hranicami martenzitických útvarov
- Spevňovacie mechanizmy spolu so značným vnútorným napätím, spôsobujú vysokú krehkosť martenzitu

# Zjednodušená schéma premeny austenitu



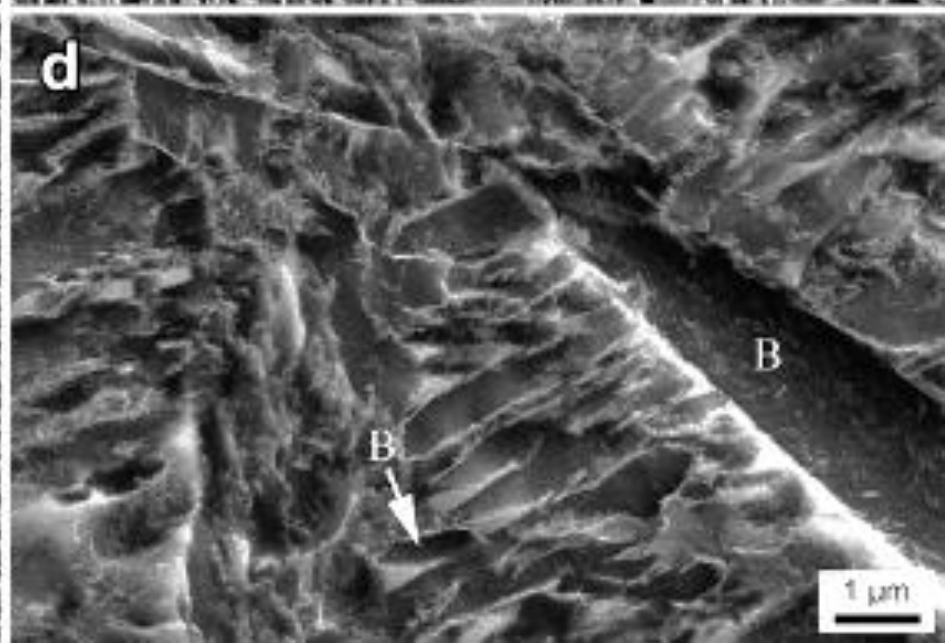
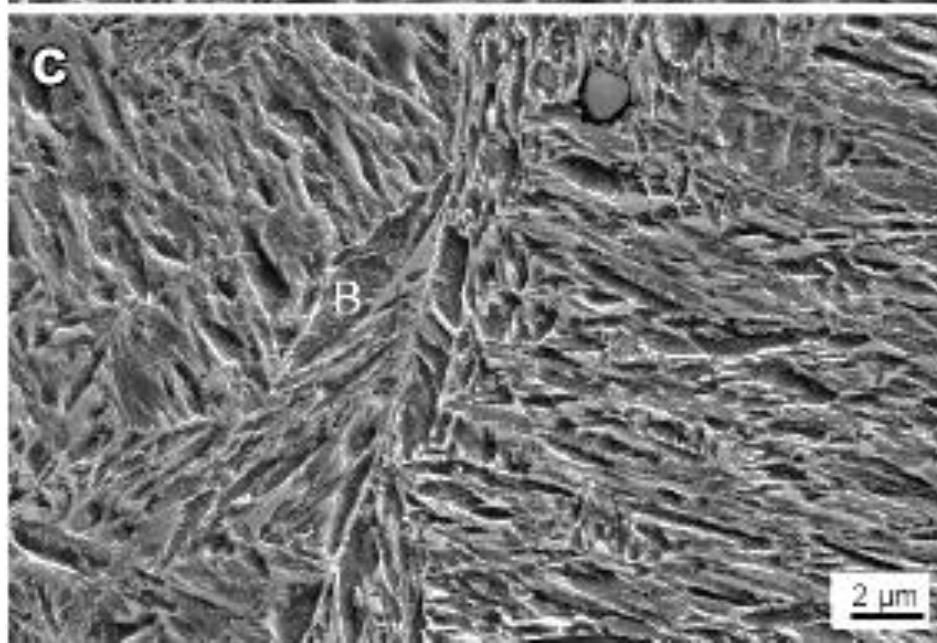
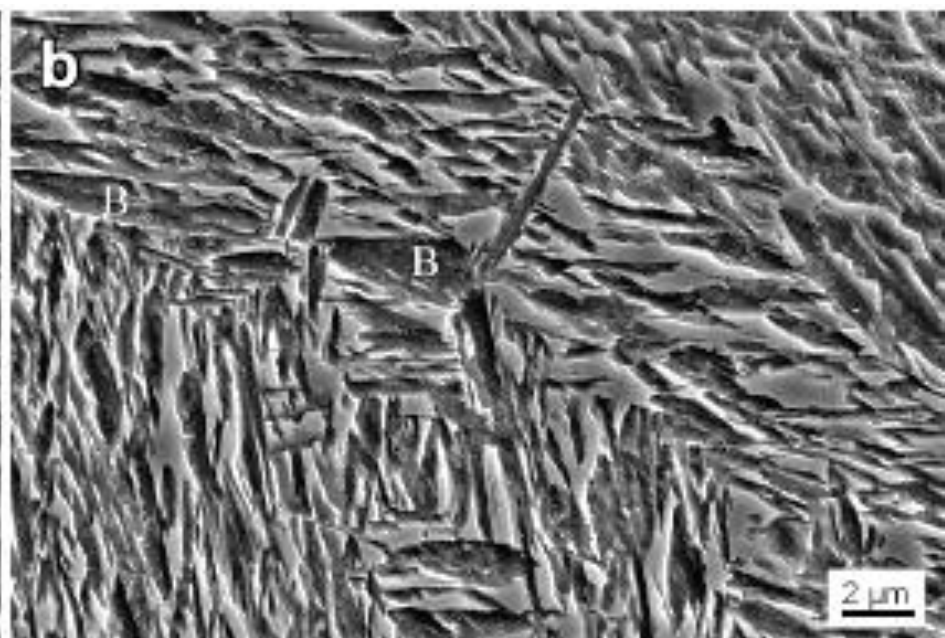
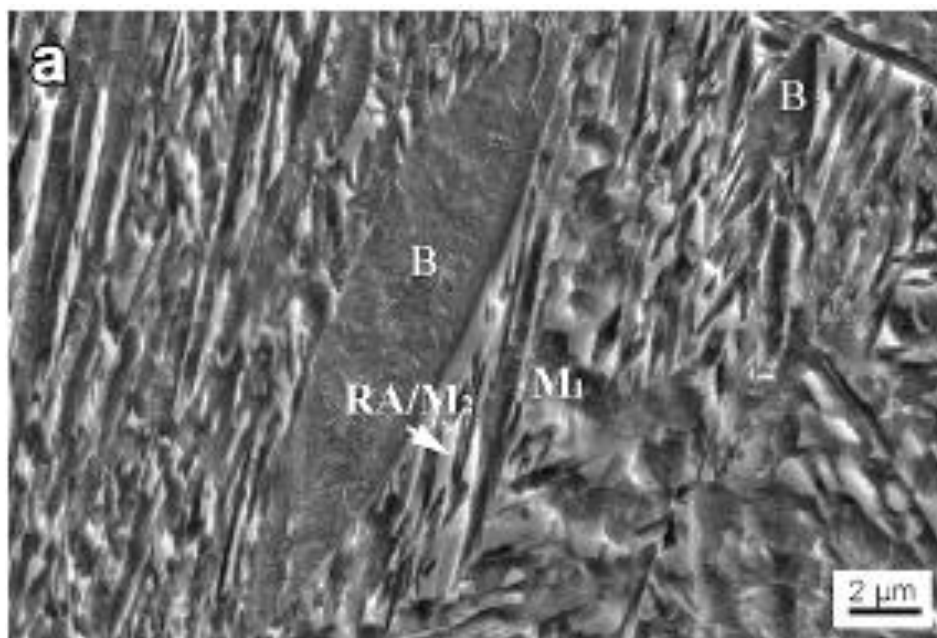


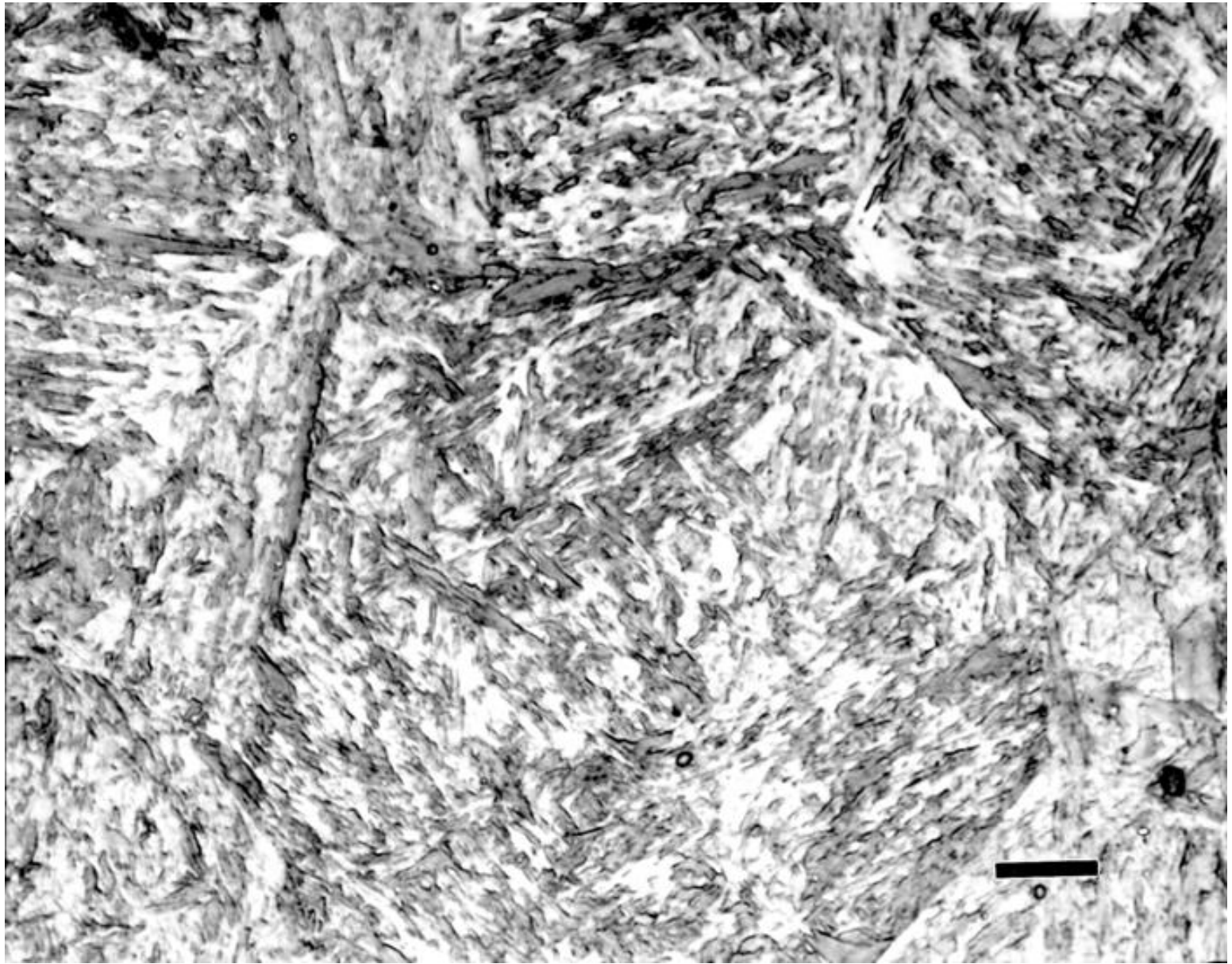
# Kalenie vplyv rýchlosti ochladzovania



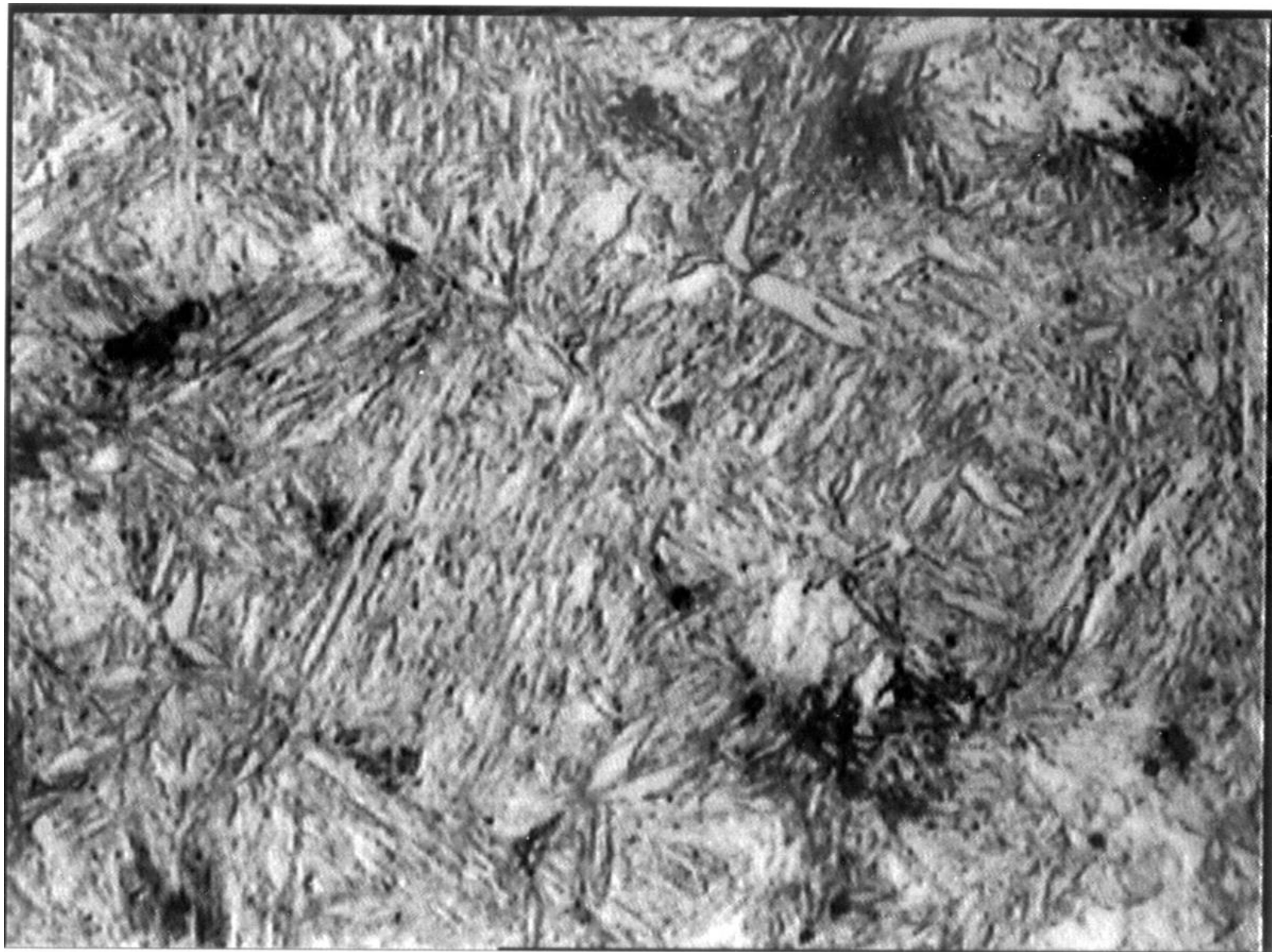
S 600

Nové trendy v povrchovej úprave materiálov pre zvýšenie kvality a životnosti nástrojov  
Hotel Turiec 19.3.2015 Tepelné spracovanie nástrojových ocelí Rusnák Rastislav











temperature/°C

