

# **Rozpad austenitu**

3. cvičení

Strojírenské materiály

# Fázové přeměny v ocelích

- Vlastnosti ocelí závisí nejen na chemickém složení, ale i na struktuře. Požadovanou strukturu lze dosáhnout tepelným zpracováním, tj. řízenými tepelnými cykly.
  
- Při nich probíhají fázové přeměny:
  - austenitizace
  - perlitická
  - bainitická
  - martenzitická přeměna

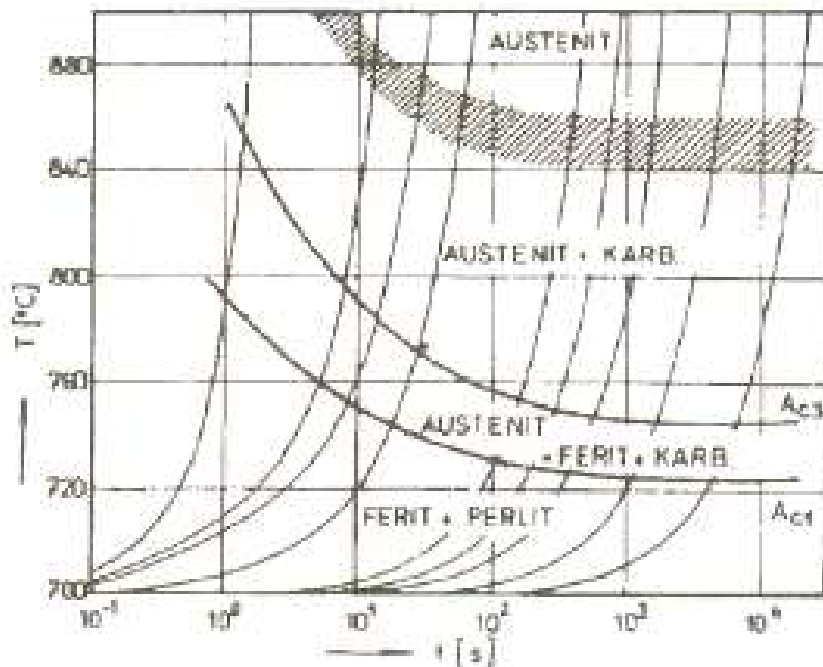
příp. přeměny při popouštění

Zdroj:[1]

# Austenitizace

- Základním úkonem při všech pochodech překrytizačního tepelného zpracování je ohřev nad kritické teploty a přeměna feriticko-cementitické struktury na strukturu austenitickou— austenitizace.
- V průběhu austenitizace - homogenizace austenitu a růst austenitického zrna.
- U všech ocelí začíná pochod přeměnou perlitu v austenit a za ním následuje postupné rozpouštění feritu (oceli podeutektoidní) nebo cementitu (oceli nadeutektoidní) v austenitu se vzrůstající teplotou nad  $A_{C1}$ .
- Podeutektoidní oceli v rozmezí teplot  $A_{C1}$ — $A_{C3}$ , u nadeutektoidních ocelí v rozmezí teplot  $A_{C1}$ - $A_{cm}$  a u ocelí eutektoidních při teplotě  $A_{cm}$ .
- Přeměna má difúzní charakter a probíhá tvorbou zárodků austenitu a jejich dalším růstem.

- Po přeměně perlitu zůstávají v austenitu zachovány zbytky karbidů, které se postupně rozpouštějí. Lokální rozdíly koncentrací uhlíku se postupně vyrovnávají v průběhu času a při zvyšování teploty.
- Na průběh austenitizace má vliv - druh výchozí struktury a složení oceli.
- Nejrychleji probíhá přeměna u ocelí zušlechtěných se strukturou jemného sorbitu.
- Jemný perlit austenitizuje rychleji než hrubý a nejpomaleji probíhá přeměna u hrubého zrnitého perlitu.

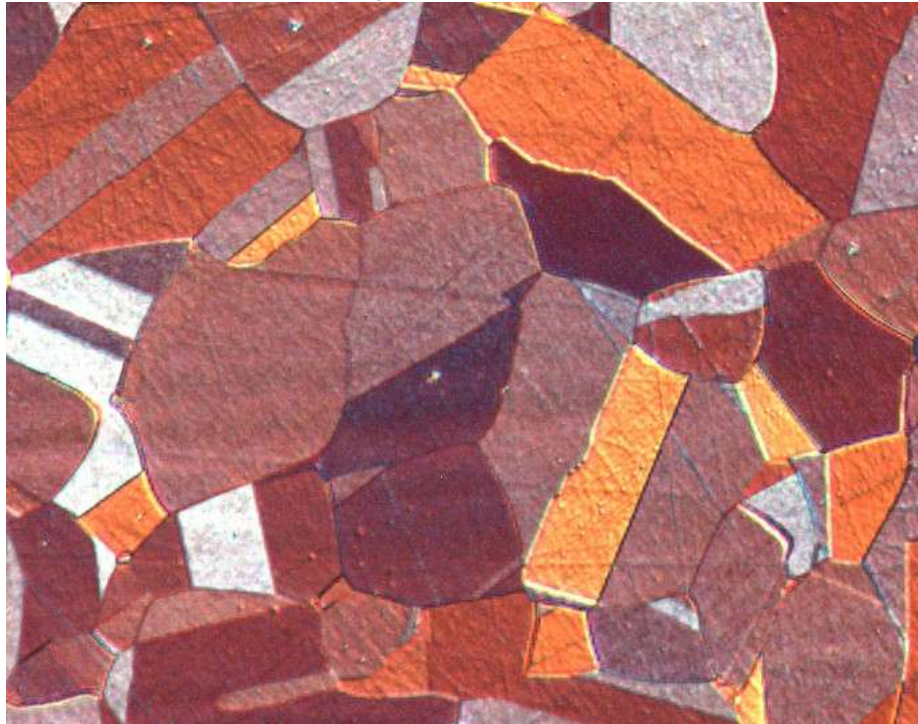


Austenitizační diagram uhlíkové oceli (0,7 hm. % C) s výchozí strukturou lamelárního perlitu a feritu.

Zdroj:[3]

# Austenitické zrno a jeho velikost

- Velikost austenitického zrna je důležitou veličinou, která má vliv na řadu mechanických i technologických vlastností ocelí, jak je patrné z tab. (5/47).
- Velikost austenitického zrna dané oceli závisí na stavu výchozí struktury, podmínkách překrytalizace a na teplotě a době austenitizace.



Zdroj:[2]

Stav oceli	Vlastnost	Vliv zrna o větší jemnosti
Ve stavu austenitickém	Kovatelnost Rychlost oduhlíčení a nauhličení	houšší menší
Po vyžehání	dobrobitelnost opracovaný povrch modul pružnosti mez úměrnosti pevnost prodloužení zářeni vrubová houževnatost tvrdost rozdíl mezi popuštěnou a normalizo- vanou strukturou	menší lepší míně vyšší míně nižší míně nižší větší větší větší menší
Po zakalení a popuštění	nejvyšší tvrdost prokalitelnost vrubová houževnatost tlhliny po zakalení množství zbytkového austenitu sklon k deformacím vnitřní pruti měkká místa	menší závislá na velikosti zrna mnohem menší mnohem větší menší sklon k tvoření tlhlin menší menší menší častější

# PŘEMĚNY AUSTENITU

- V důsledku polymorfie se při ochlazování přeměňuje kubická plošně centrovaná modifikace železa v modifikaci kubickou prostorově centrovanou.
- Přeměna je doprovázena výraznou objemovou změnou, způsobenou větší hustotou uspořádání atomů v mřížce  $\gamma$  než v mřížce  $\alpha$ .
- U uhlíkových ocelí tvoří rovnovážnou strukturu směs feritu a cementitu; proto za podmínek blízkých se rovnovážným se austenit rozpadá v perlit.
- Perlitická přeměna
- Bainitická přeměna
- Martenzitická přeměna

Zdroj:[1]

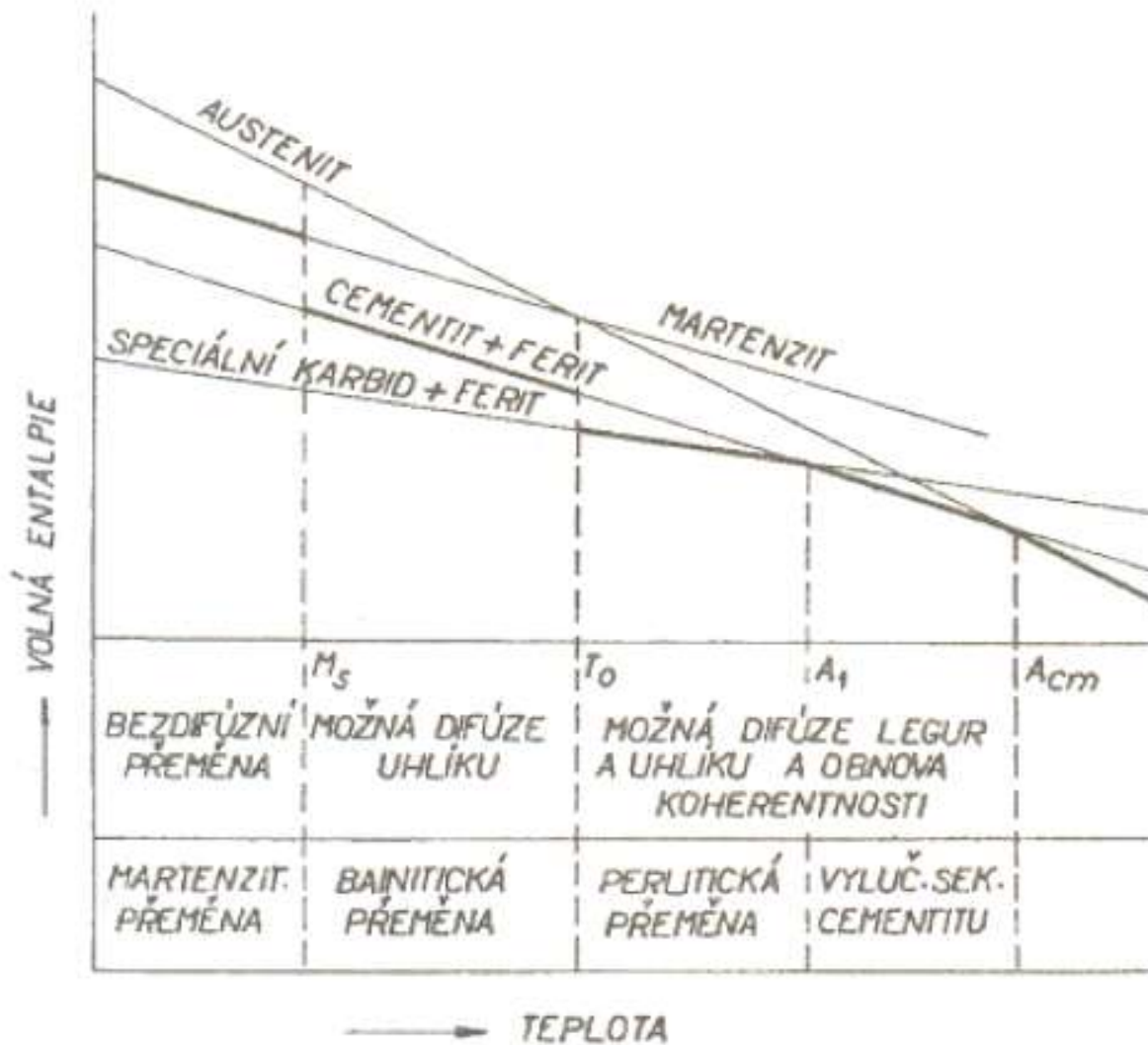
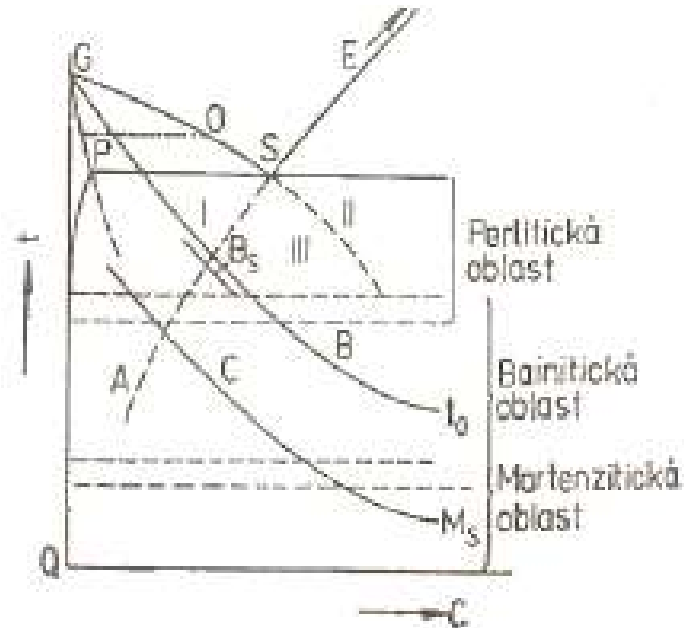


Schéma termodynamických podmínek přeměn austenitu

Zdroj:[3]



- Oblasti výskytu hlavních typu přeměn přechlazeného austenitu jsou schématicky znázorněny v doplněné části diagramu Fe-C na obr.
- Čáry udávající počátek "přesycení" austenitu feritem (GS) a cementitem (ES) jsou prodlouženy pod teplotou  $A_1$ .
- Čára  $t_0$  odpovídá "rovnováze" mezi tuhým roztokem  $\gamma$  a tuhým roztokem  $\alpha$  téhož složení.



Část rovnovážného diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C doplněná o oblasti výskytu jednotlivých přeměn austenitu.

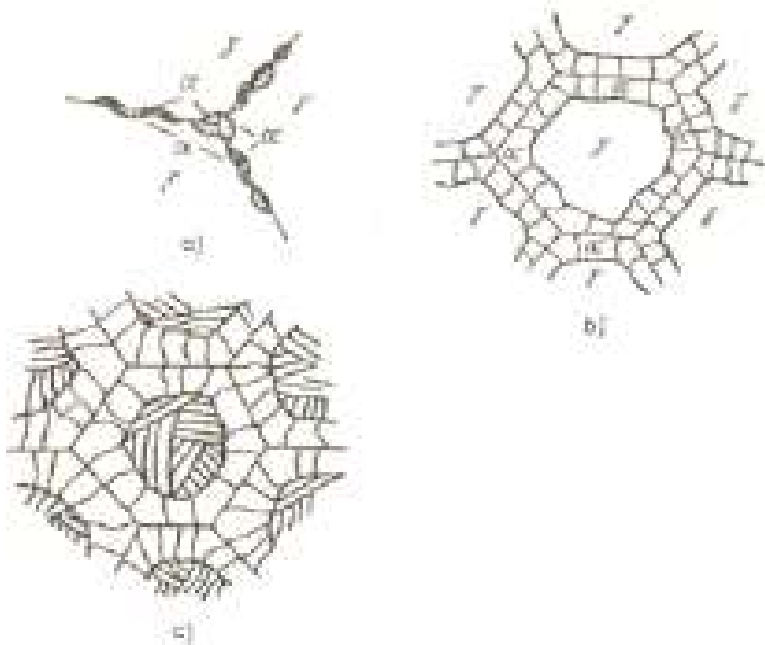
Zdroj:[3]

- Vzájemná souvislost jednotlivých přeměn nejlépe vyjádřena v transformačních diagramech přechlazeného austenitu IRA a ARA.
- Příslušné linie diagramů lze získat např. stanovením kinetických křivek izotermického rozpadu austenitu, které, vyjadřují podíl přeměny v závislosti na čase.
- U všech ocelí, s výjimkou ocelí s eutektoidní koncentrací uhlíku, předcházejí eutektoidní (tj. perlitické) přeměně tzv. přeměny proeutektoidní.
- Proeutektoidní přeměna nastává po přesycení austenitu vzhledem k jedné z perlitických fází, tj. po překročení křivky GS nebo ES (pole I - proeutektoidní ferit, pole II – proeutektoidní cementit).
- Perlitická přeměna probíhá v oblasti ležící pod křivkami GS i ES, tj. v poli III.

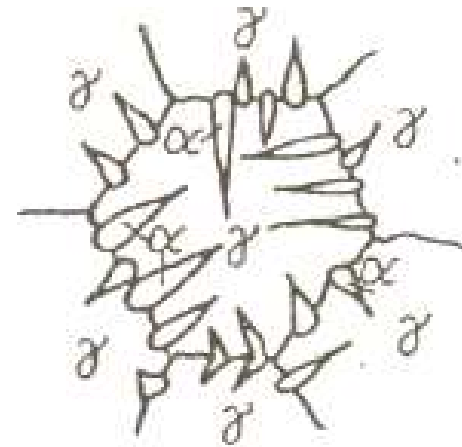
Zdroj:[3]

- Místa přednostní nukleace proeutektoidních fází jsou zpravidla hranice zrn (vysoký stupeň neuspořádanosti, vysoká rychlost difúze podél hranic zrn).
- Zpravidla jedno mezifázové rozhraní nové fáze je semikoherentní, ostatní rozhraní jsou nekoherentní. V důsledku rozdílných mezifázových struktur a růstových mechanismu mohou vznikat v přilehlých austenitických zrnech výrazně odlišné morfologie.
- Dvě výrazně odlišné morfologie:
  - Alotriomorfní tvary čočkovitého tvaru, jejichž srůstáním se vytvoří souvislé síťové feritu (cementitu) na hranicích austenitických zrn (obr.-11/47). Tyto útvary vznikají při teplotách těsně pod křivkami GS, resp. ES v důsledku difúzního růstu nekoherentního mezifázového rozhraní.
  - Widmannstättenovy desky, nebo jehlice, které vznikají při větších přechlazeních a při relativně značné velikosti austenitických zrn, (obr.-11/47).

Zdroj:[3]



Schématické znázornění nukleace a růstu alotriomorfních útvaru proeutektoidního feritu  
 a - nukleace a růst zárodku feritu, b - síťový feritu po hranicích austenitických zrn,  
 c – transformace zbylého austenitu na perlit



Widmannstättenova struktura – schéma růstu feritu do austenitu

Zdroj:[3]





Widmannstättenova struktura

# Perlitická přeměna

- Perlitická přeměna je technicky nejvýznamnějším druhem eutektoidního rozpadu tuhého roztoku. Austenit o eutektoidní koncentraci po ochlazení pod kritickou teplotu  $A_1$  se rozpadá v eutektoid zvaný perlit:



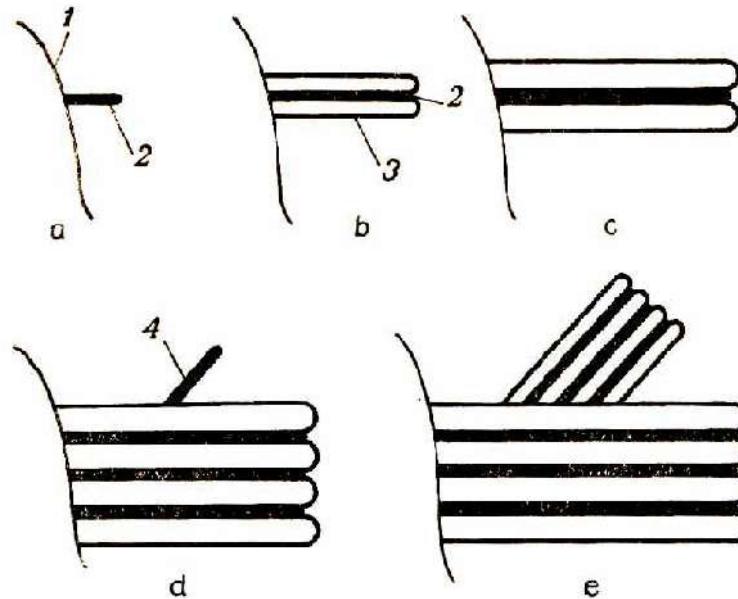
- *Perlitická přeměna* austenitu probíhá za poměrně vysokých teplot ( $500^\circ\text{C}$ ), kdy je v plném rozsahu možná účinná difúze uhlíku, přísadových prvků i samodifúze železa.
- Vznik perlitu je charakterizován dvěma ději. Je to polymorfní přeměna železa  $\gamma$  v železo  $\alpha$ , se kterou je spojena výrazná změna rozpustnosti uhlíku.
- Uhlík přítomný v množství větším, než je jeho rozpustnost ve feritu, se vylučuje jako cementit  $\text{Fe}_3\text{C}$ .
- Reakce má stacionární povahu, chemické složení zúčastněných fází se v průběhu pochodu nemění.

Zdroj:[2], [3]

- Perlitická přeměna začíná heterogenní nukleací vedoucí fáze zpravidla na hranicích austenitických zrn, s menší četností pak na fázových rozhraních austenit - minoritní fáze (vměstky, nerozpuštěné karbidy).
- Rychlost nukleace nejmenší v čistých hrubozrnných ocelích, naopak maximální rychlosti odpovídají znečištěným jemnozrnným ocelím.
- Vedoucí fází přeměny může být jak ferit tak cementit.
- Tvorba perlitu začíná vznikem destičky cementitu nebo feritu, jež nukleuje na hranici austenitu.
- Jestliže první vznikne cementit je v bezprostředním okolí austenitu méně uhlíku a může vzniknout feritická lamela.
- To vede k obohacení o uhlík a proto může vzniknout další destička cementitu.

Zdroj:[2]

# Schéma mechanismu tvorby perlitické kolonie

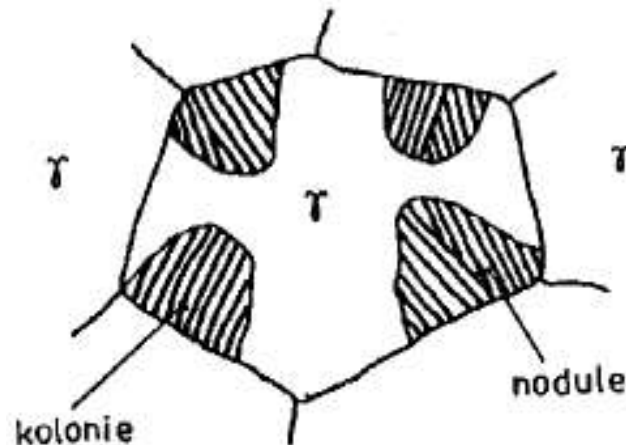


a až e – postup vzniku zárodků a růstu perlitických kolonií, 1 – hranice zrna austenitu, 2 – destička (lamela) cementitu, 3 – destička feritu, 4 – destička cementitu – zárodek nové perlitické kolonie

Zdroj:[3]

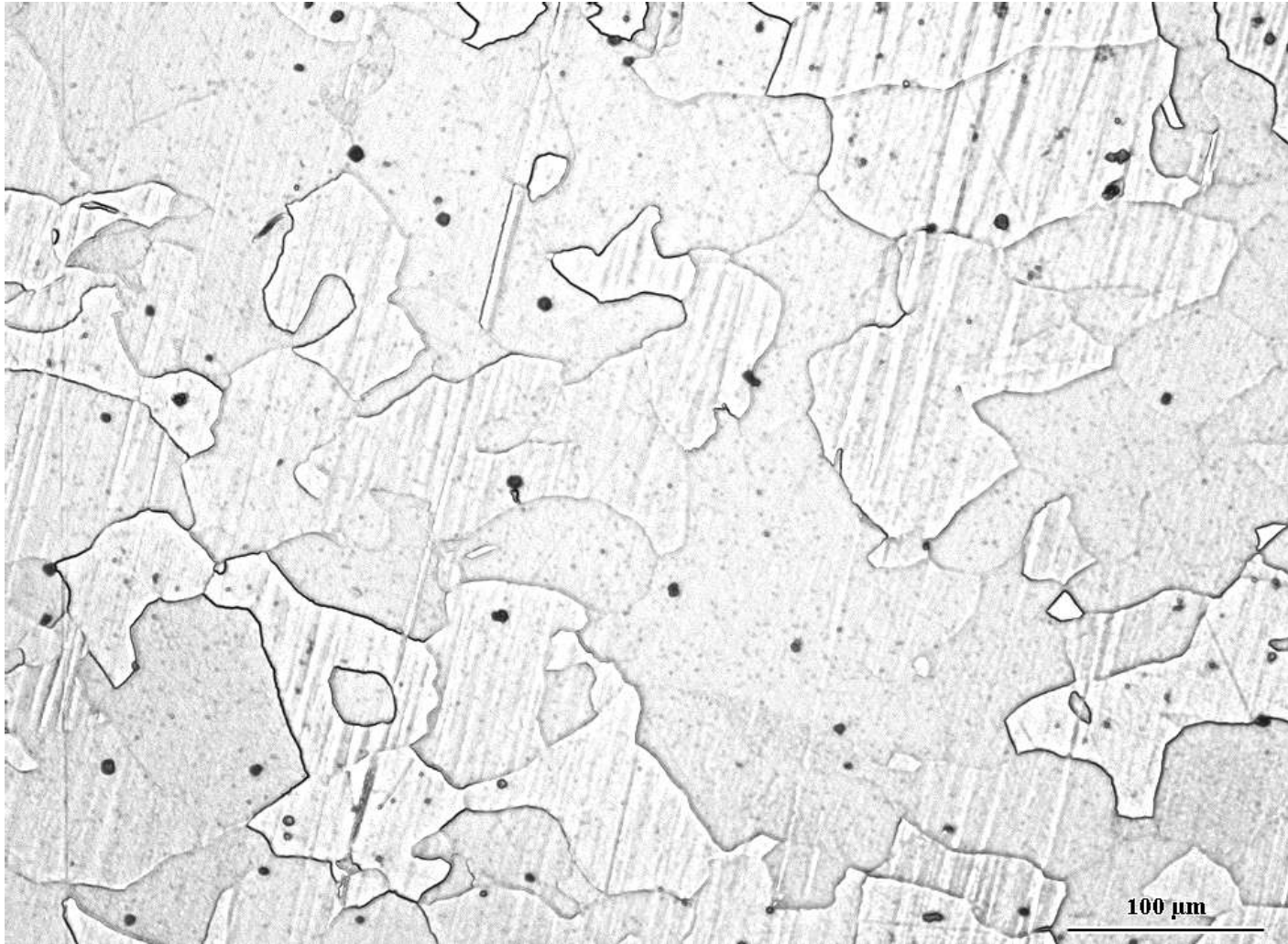


- V průběhu růstu perlitové kolonie vznikne lamela cementitu, která má vzhledem k výchozímu austenitu jinou orientaci a stane se základem nové perlitové kolonie. Tak vznikne shluk perlitových kolonií, který tvoří zrno perlitu.
- Mimo perlitu s typickou lamelární morfologií se může vyskytovat i perlit zrnitý (globulární), ve kterém se cementit vyskytuje ve tvaru částic globulárního tvaru.
- Zrnitý perlit představuje strukturu termodynamicky stabilnější než perlit lamelární, neboť jeho mezi fázová energie je menší.
- Zrnitý perlit vzniká velmi pomalým ochlazováním v okolí teploty  $A_1$  a nebo žíháním na měkko.

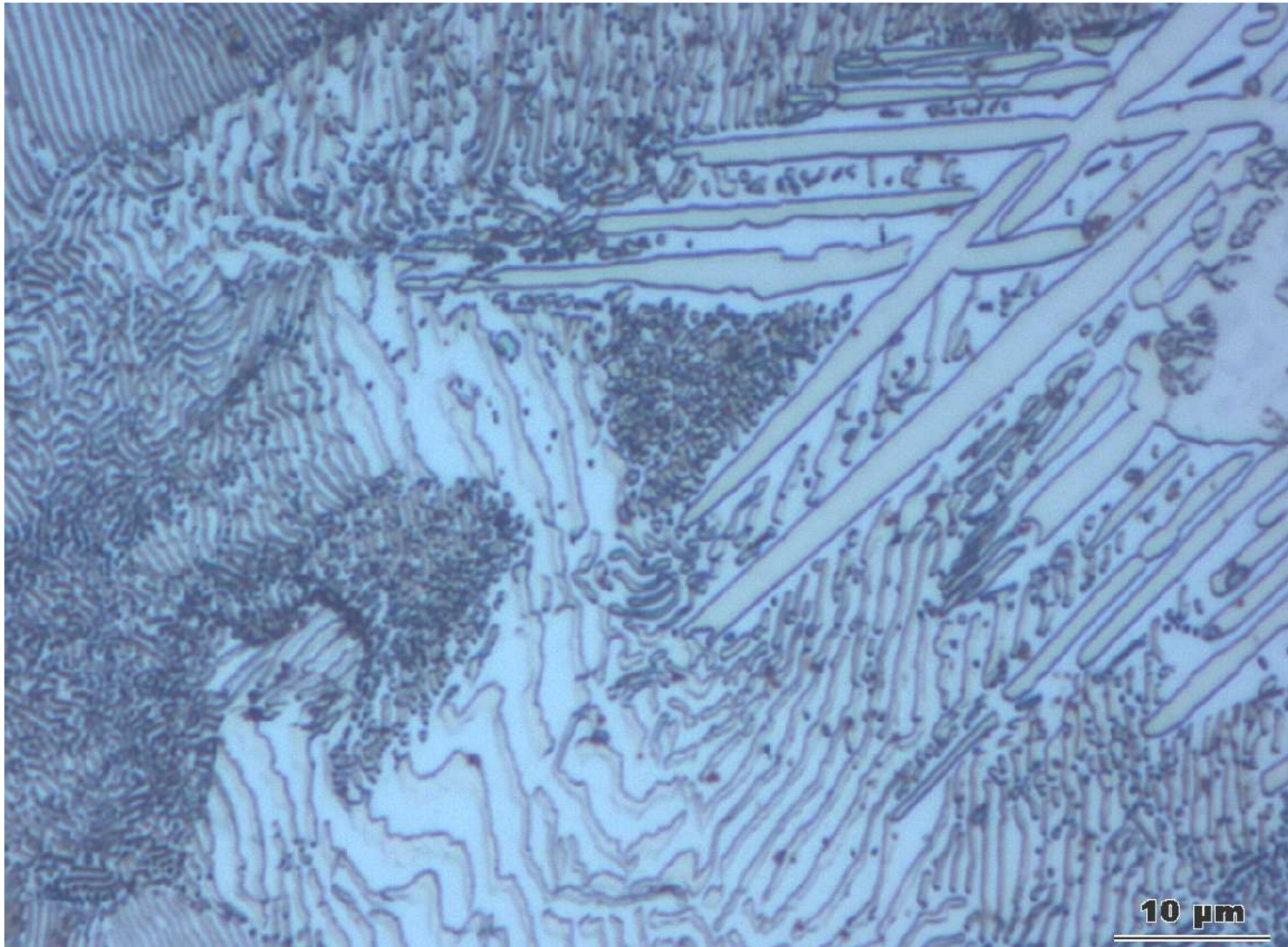


Zdroj:[3]

# Ferit

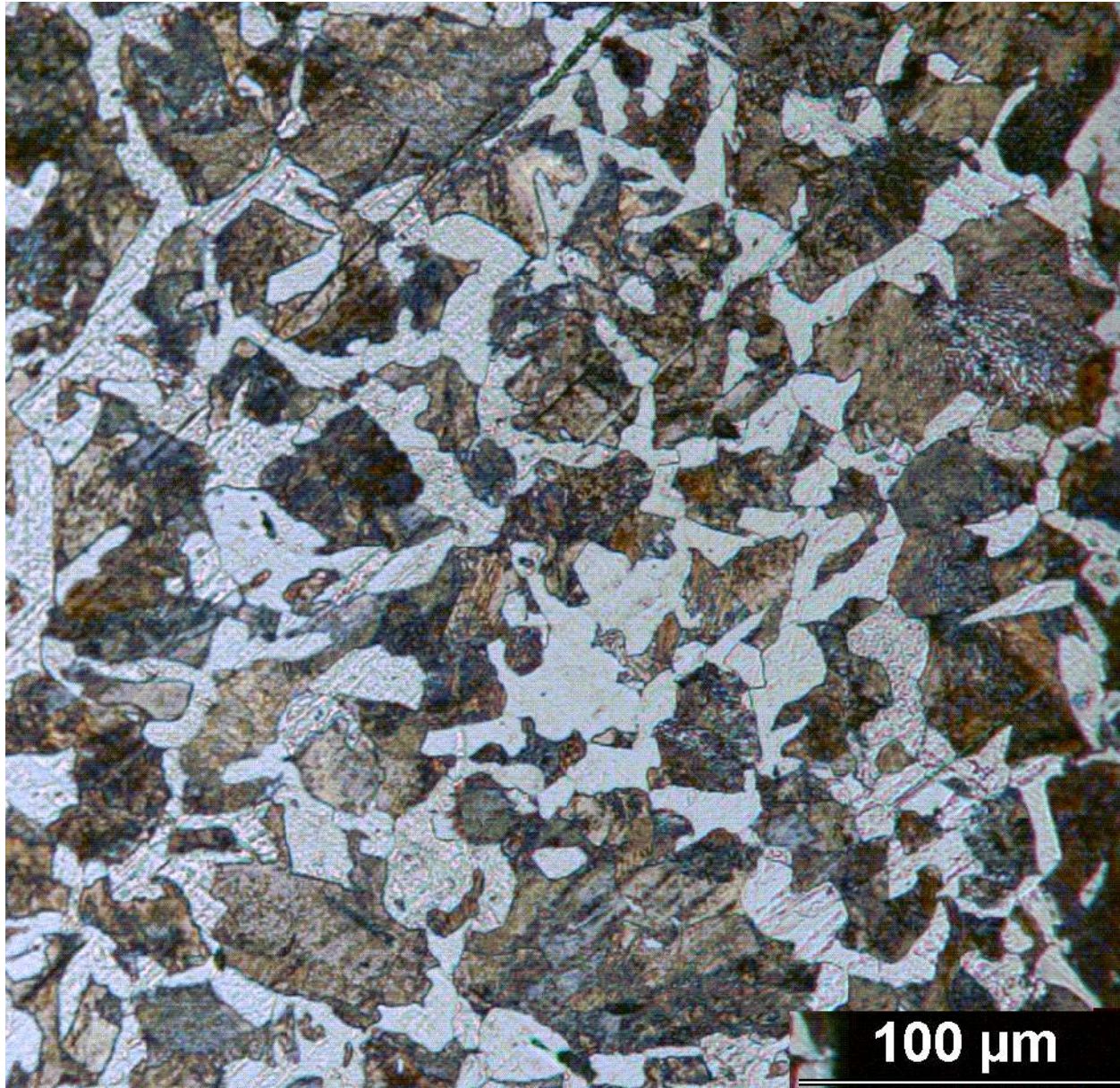


# Cementit



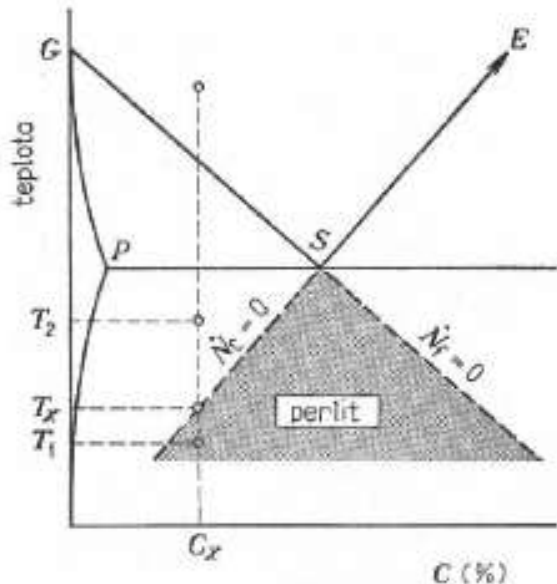


# Feriticko – perlitická struktura



# Kinetika perlitické přeměny

- Perlitická přeměna probíhá tvorbou zárodků a jejich růstem a pro danou teplotu přeměny její průběh vyjadřuje izotermická kinetická křivka.
- Kinetické parametry, tj. rychlost nukleace  $N$  a rychlost růstu se mění s teplotou přeměny; obě hodnoty se s poklesem teploty až po jistou mez zvětšují, jak je zřejmé z obr.



Austenit s menším obsahem uhlíku než eutektoidním ( $c_x$ ) se při teplotách pod  $T_x$  (např.  $T_1$ ) rozpadá na perlit. Podeutektoidní ferit vzniká jen při teplotách nad  $T_x$  (např. při  $T_2$ ). Jestliže chemické složení a teplota izotermického rozpadu leží mimo vyčárkovanou oblast pak předchází vzniku perlitu podeutektoidní ferit popř. nadeutektoidní cementit.

Zdroj:[4]

Diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C – Rozmezí koncentrace uhlíku v závislosti na teplotě pro perlitickou přeměnu

No – rychlost nukleace cementitu

Nf – rychlost nukleace feritu

- Rychlost tvorby zárodků perlitu závisí na velikosti zrna a homogenitě austenitu, na přítomnosti vměstků .... Rychlost tvorby zárodků perlitu závisí i na čase a na teplotě.
- Při nižších teplotách vznikají menší perlitové kolonie a zrna perlitu – austenit se rozpadá za vzniku jemnějšího perlitu.
- Rychlost nukleace, která vzrůstá s klesající teplotou až k nosu diagramu IRA, je veličinou silně strukturně závislou.
- Nejpriznivější podmínky pro nukleaci perlitu jsou v oblastech o vysoké energii, kde je největší nahromadění defektů struktury.
- V homogenním austenitu jsou to především hranice zrn, a proto velikost austenitického zrna má velký vliv na rychlost perlitické přeměny.
- U hrubozrnných ocelí je rychlost perlitické přeměny menší než u jemnozrnných, neboť množství míst příznivých pro nukleaci je malé.

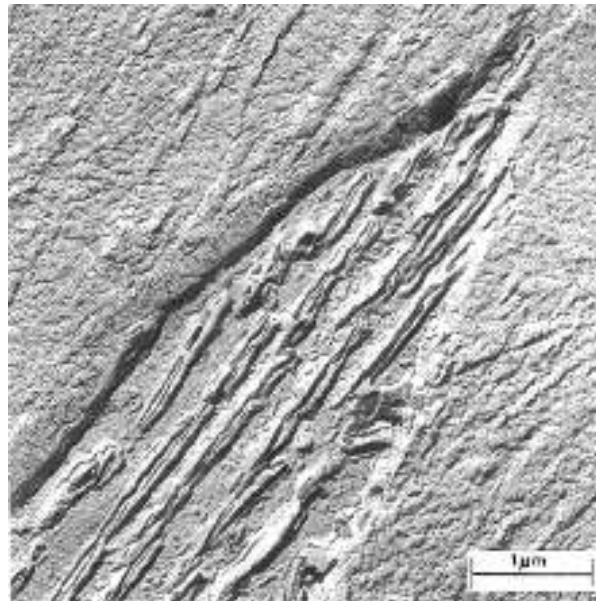
Zdroj:[4]

# Bainitická přeměna

- Při větším přechlazení austenitu, když jeho přeměna probíhá při teplotách nižších - 500 až 200 °C.
- Za těchto podmínek probíhá *bainitická přeměna* a produktem tohoto rozpadu je bainit, nerovnovážná jehlicovitá struktur součástka, tvořená směsí přesyceného feritu a karbidů.
- Přeměna má rysy podobné jak difúzní, tak martenzitické přeměně, jak to odpovídá její poměrně nízkoteplotní oblasti, kdy možnosti difúze jsou již omezené.
- Zahrnuje strukturní přeměnu  $F_{\gamma} \rightarrow F_{\alpha}$  a změnu rozložení uhlíku, ale nedochází ke změnám v rozložení přísadových prvků, neboť difúze substitučních prvků a také samodifúze železa za poměrně nízkých teplot přeměny není dostatečně účinná.
- Rozpad austenitu v bainitické oblasti má charakter martenzitické přeměny, jejíž průběh je však podmíněn změnou rozdělení uhlíku v austenitu.
- Následkem difúze atomů uhlíku je růst bainitu podstatně pomalejší než růst martenzitu. O smykové povaze přeměny svědčí také reliéf, který vzniká na povrchu vzorku a který se přičítá vzniku bainitického feritu.



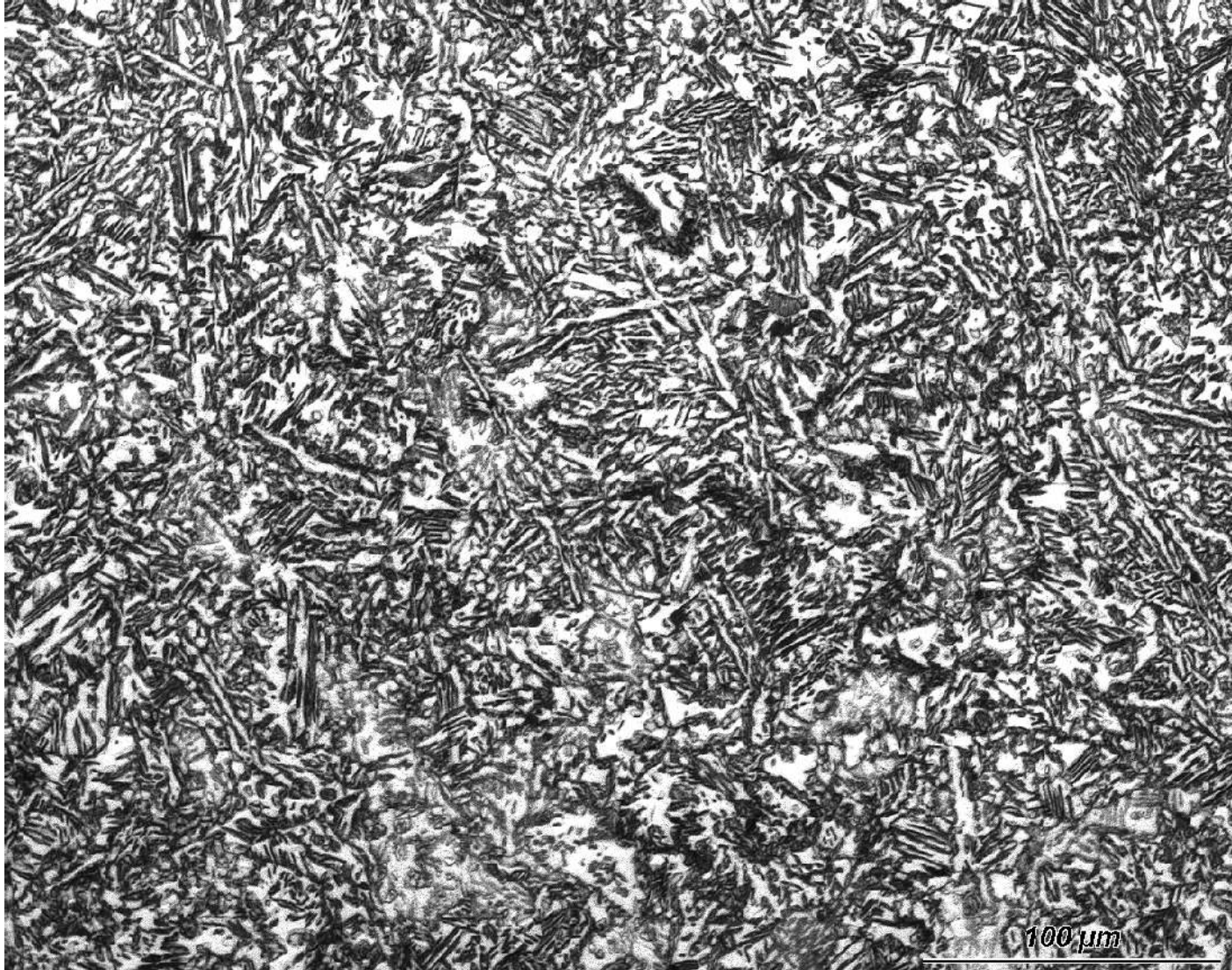
- Morfologie bainitické struktury dané oceli výrazně závisí na teplotě přeměny nebo na rychlosti ochlazování přes bainitickou oblast.
- Podle transformační teploty rozlišujeme:
  - **Horní bainit** – vzniká při teplotách 350 - 500°C, jeho strukturu tvoří svazky hrubších jehlic bainitického feritu s podélně uspořádanými částicemi cementitu, které jsou vyloučeny hlavně na povrchu jehlic.
  - **Dolní bainit** vzniká při teplotách nižších a je tvořen tenkými deskami bainitického feritu více přesyceného uhlíkem, takže k precipitaci karbidů dochází převážně uvnitř desek. Je jemnější než horní bainit a vlastnosti se blíží vlastnostem martenzitu.



Zdroj:[1]



# Bainit

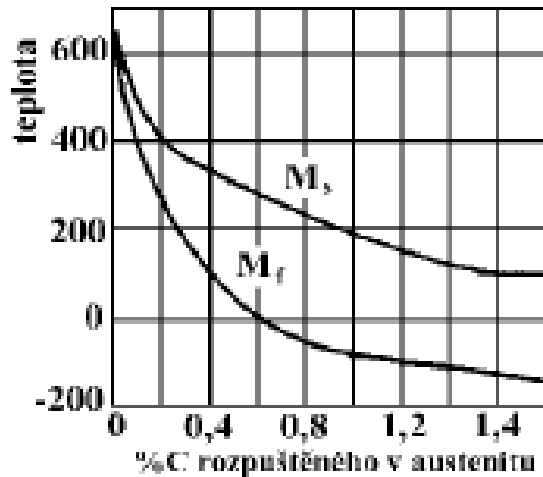


# Martenzitické přeměna

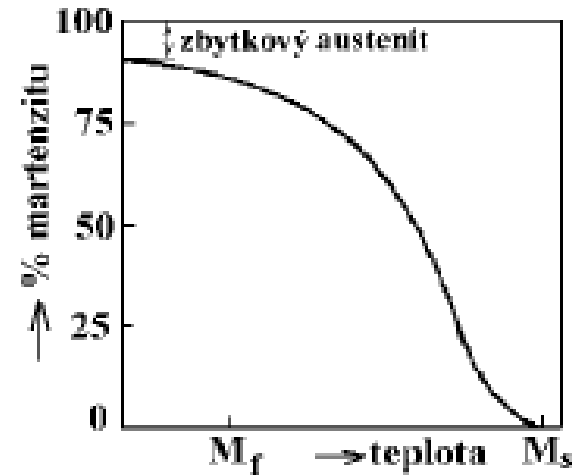
- Při největším přechlazení z austenitu (teplota nižší než 200°C) vzniká *martenzitickou přeměnou* martenzit, tj. nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ .
- Je-li austenit přechlazen až do oblasti tak nízkých teplot, že již není možná účinná difúze nejen přísadových prvků, ale také uhlíku, přeměňuje se bezdifúzní přeměnou.
- Produktem této přeměny, jež probíhá v rozmezí  $M_s$  až  $M_f$ , je nerovnovážný, silně přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ , zvaný martenzit.
- Aby vznikla tato metastabilní fáze, jež je hlavní strukturní součástí zakalených ocelí, je nutné ochlazovat austenitizovanou ocel pod teplotu  $M_s$  v čase kratším, než je doba potřebná pro zahájení perlitické nebo bainitické přeměny.

Zdroj:[3]

- Minimální rychlost, při které jsou ještě zcela potlačeny difúzní přeměny austenitu a probíhá jako bezdifúzní přeměna na martenzit, se označuje jako kritická rychlost kalení.
- Její hodnota závisí na složení a na struktuře austenitu a např. u uhlíkových ocelí dosahuje hodnoty až  $1000\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ .



Závislost  $M_s$  a  $M_f$  na obsahu C v austenitu



Martenzitická křivka

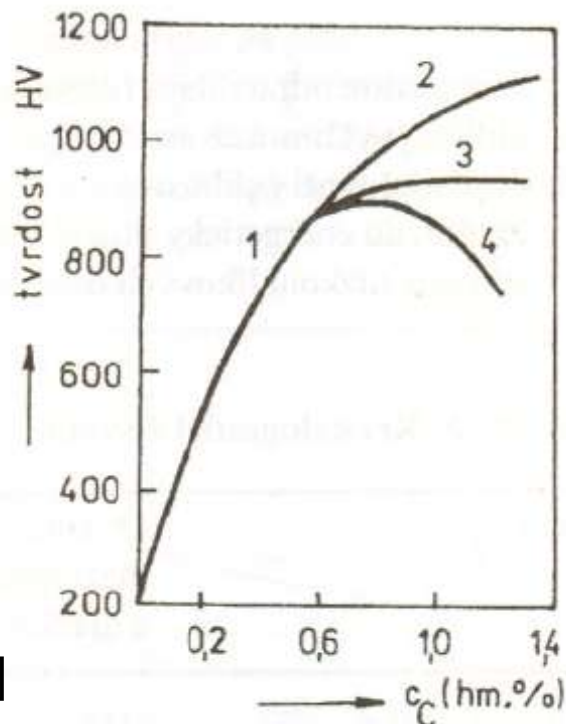
Zdroj:[4]

- Ve srovnání s perlitickou přeměnou má martenzitická transformace některé zvláštní rysy:
  - teploty, při kterých martenzitická transformace začíná ( $M_s$ ,  $M_{start}$ ) a končí ( $M_f$ ,  $M_{finish}$ ), nezávisí na rychlosti ochlazování austenitu.
  - Teplota  $M_s$  je funkcí stavu austenitu, především jeho chemického složení
  - martenzitická transformace začíná ihned po dosažení teploty  $M_s$  – bez inkubační doby.
  - teplota  $M_f$  je definována jako teplota pod kterou již atermická martenzitická transformace neprobíhá nebo je její rozsah zanedbatelně malý.
  - I pod  $M_f$  však zůstává ve struktuře určitý podíl zbytkového austenitu.

Zdroj:[1]

# Vlastnosti martenzitu

- Všechny druhy martenzitu vyskytující se v ocelích jsou tvrdší, než je tvrdost výchozí fáze.
- Největší nárůst tvrdosti je však možné pozorovat vzniká-li martenzit z intersticiálního tuhého roztoku, např. Fe-C, Fe-N.
- Závislost tvrdosti martenzitu na obsahu uhlíku v soustavě Fe-C je uvedena na obr.



Vliv obsahu uhlíku na tvrdost

1- martenzitu v podeutektoidní oceli kalené z teploty nad  $A_{c3}$

2 - pouze martenzitu v nadeutektoidní oceli kalené z teploty nad  $A_{cm}$

3 - struktury tvořené martenzitem a sekundárním cementitem v nadeutektoidní oceli kalené z teploty nad  $A_{c1}$

4 - struktury tvořené martenzitem a zbytkovým austenitem v nadeutektoidní oceli kalené z teploty nad  $A_{cm}$

- Velká tvrdost martenzitu v ocelích je dána těmito zpevňujícími mechanismy:
  - zpevnění tuhého roztoku, zejména intersticiálním uhlíkem,
  - zpevnění vyvolané hranicemi martenzitických útvarů,
  - substrukturní zpevnění (dislokační nebo dvojčatový martenzit).
- Zbytkový austenit (ZA), vyskytující se v zakalených ocelích může v některých případech příznivě ovlivňovat jejich tvárnost, houževnatost, zvláště vytváří-li např. obálky jehlic martenzitu.
- Převážně se však přítomnost zbytkového austenitu považuje za nežádoucí, neboť snižuje tvrdost zakalené oceli a může docházet k jeho samovolné přeměně na feriticko-karbidickou směs bainitického typu, která je doprovázena změnou vlastností, rozměrů, popř. i tvaru zakalené součásti, lokálním nárůstem vnitřního pnutí s možným vznikem trhlin.
- Přílišná tvrdost a křehkost zakalené oceli spolu se zbytkovým austenitem se odstraňují popouštěním, které by mělo následovat bezprostředně po zakalení.

Zdroj:[2]

# Martenzit



# Transformační diagramy ocelí

- Znalosti kinetiky přeměn austenitu jednotlivých ocelí mají značný praktický význam při jejich tepelném zpracování, neboť pouze v některých případech tohoto zpracování se děje přeměna austenitu jediným způsobem.
- Většinou austenit prodělává radu přeměn, a to zejména u součástí větších rozměrů, u kterých se mohou značně lišit rychlosti ochlazování v jednotlivých oblastech průřezu. Je proto zapotřebí sledovat vzájemný vztah a souslednost přeměn austenitu, k čemuž lze využít transformačních diagramů.
- Transformační diagramy austenitu znázorňují teplotní a časovou závislost průběhu přeměn přechlazeného austenitu.
- Konkrétní transformační diagram platí jen pro určitou ocel (určité chemické složení, nebo jeho rozmezí dané např. ČSN) a pro určité podmínky austenitizace (velikost zrn austenitu a jeho homogenita).
- Tyto údaje by měly být uváděny u každého transformačního diagramu.



- Užívané transformační diagramy jsou dvojího druhu, a to izotermické a anizotermické.
- Diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA) udávají dobu přeměn austenitu za izotermických podmínek, zatímco diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA) udávají tyto doby při různých rychlostech jeho ochlazování.
- Diagramy IRA mají praktický význam při izotermických pochodech tepelného zpracování (izotermické žíhání a izotermické zušlechťování).
- Diagramy ARA se uplatňují ve větším rozsahu, neboť ve většině postupů tepelného zpracování austenit transformuje při plynulém ochlazování.
- Diagramy obou druhu se kreslí v osách teplota ( $T$ ) a logaritmus času ( $t$ ); obsahují dále údaje o kritických teplotách  $A_1, A_3, A_{cm}$  a polohy začátků a konců přeměny perlitické ( $P_s, P_f$ ), bainitické ( $B_s, B_f$ ) a martenzitické ( $M_s, M_f$ ).

Zdroj:[3]

# Diagramy izotermického rozpadu austenitu (diagramy IRA)

- Křivky počátku a konce perlitické a bainitické přeměny mají v souřadnicovém systému teplota čas přeměny tvar písmene "C" (tzv. C-křivky).
- Křivky počátku a konce perlitické a bainitické přeměny se u uhlíkových ocelí v určité oblasti překrývají (obr.), diagramy IRA jsou v této oblasti nahrazeny společnou křivkou počátku i konce izotermické přeměny.
- Vlevo od křivky (křivek) počátku perlitické a bainitické přeměny ( $P_s$ ,  $B_s$ ) až po teplotu  $M_s$  je struktura austenitická.
- Vpravo od křivky (křivek) konce přeměny ( $P_f$ ,  $B_f$ ) je struktura tvořena produkty těchto přeměn.

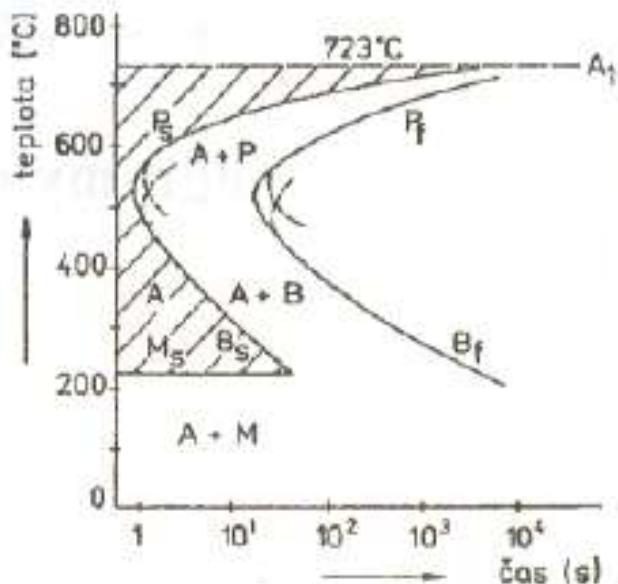
Zdroj:[3]

- V intervalu teplot  $A_1$  a tzv. nosu diagramu (asi  $550^\circ\text{C}$  u uhlíkových ocelí) vzniká izotermickým rozpadem přechlazeného austenitu uhlíkové eutektoidní oceli lamelární perlit.
- Mezilamelární vzdálenost perlitu se zmenšuje s klesající teplotou přeměny. Za teplot nižších než asi  $550^\circ\text{C}$  postupně převládá bainitická přeměna; horní bainit se zpočátku tvoří společně s perlitem, za teplot těsně nad  $M_s$  převládá dolní bainit. Pod teplotou  $M_s$  probíhá bezdifúzní martenzitická přeměna.
- S klesající teplotou přeměny vzrůstají tvrdost a hodnoty charakteristik pevnosti, avšak klesají hodnoty charakteristik tvárnosti a houževnatosti.
- Rozpad austenitu probíhá za konstantní teploty.

Zdroj:[3]

# Schéma izotermického rozpadu austenitu

Eutektoidní ocel

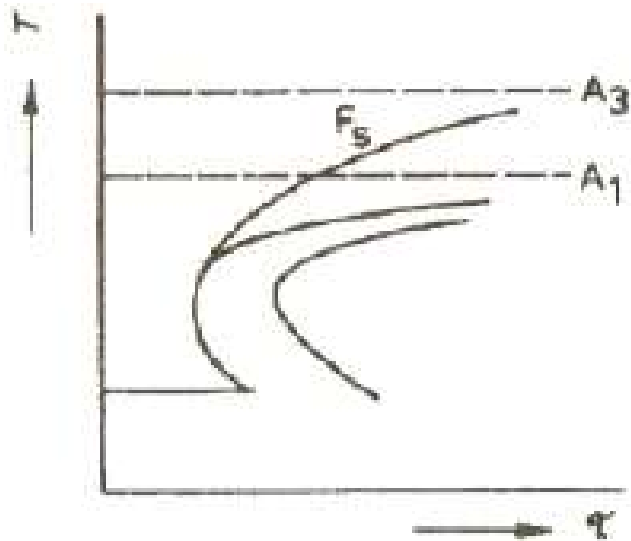


- $P_h$  < 20 HRC
- $P_j$  30 - 40 HRC
- $B_h$  40 - 45 HRC
- $B_d$  50 - 60 HRC
- $M$  65 - 67 HRC

$P_h, P_j$  - hrubý a jemný perlit  
 $B_h, B_d$  - horní a dolní bainit

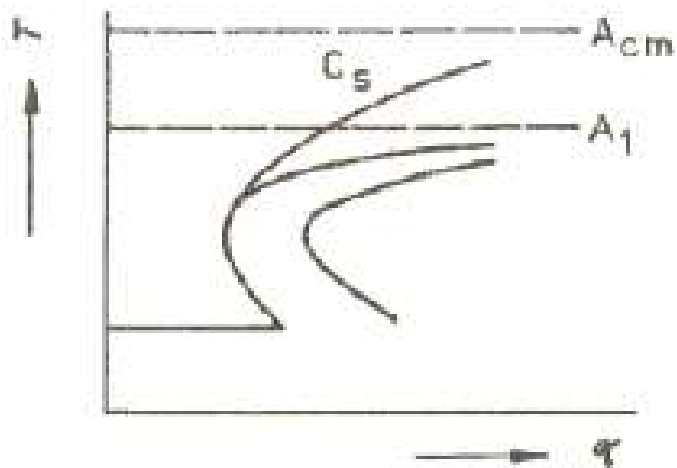
a)

Podeutektoidní ocel



b)

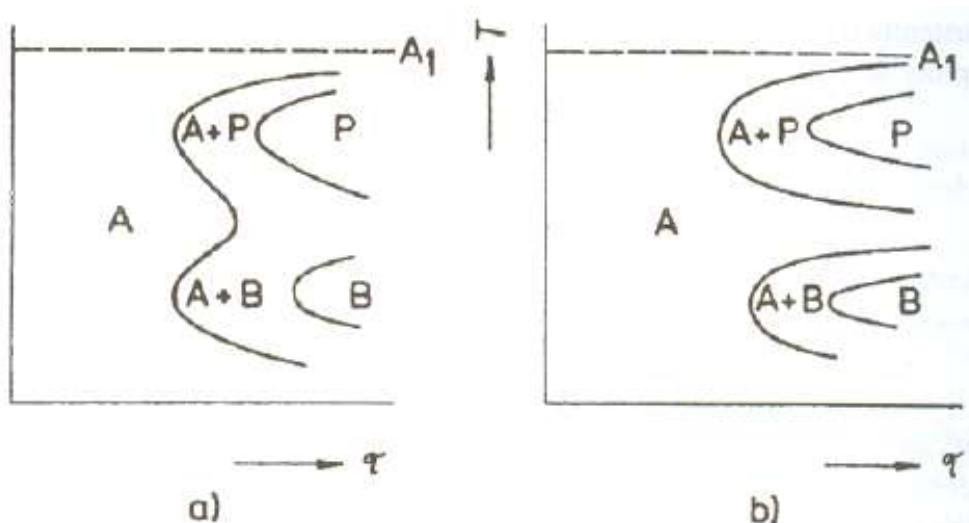
Nadeutektoidní ocel



c)

Zdroj:[3]

- Tvar a poloha křivek diagramu IRA jsou ovlivněny zejména chemickým složením oceli a stavem austenitu.
- Všechny přísadové prvky rozpuštěné v austenitu, s výjimkou hliníku a kobaltu, zvyšují jeho stabilitu, tzn. posouvají křivky počátků a konců difúzních přeměn austenitu doprava.
- Prvky rozpustné ve feritu (např. Ni, Si, Cu) nemění tvar diagramu, zatímco přísady karbidotvorné (Mo, Cr, W, V ...) současně výrazně mění i tvar diagramu.
- Karbidotvorné prvky totiž od sebe oddalují perlitickou a bainitickou oblast, diagramy IRA ocelí legovaných uvedenými prvky se proto vyznačují dvěma nosy, odpovídajícími perlitické a bainitické přeměně.

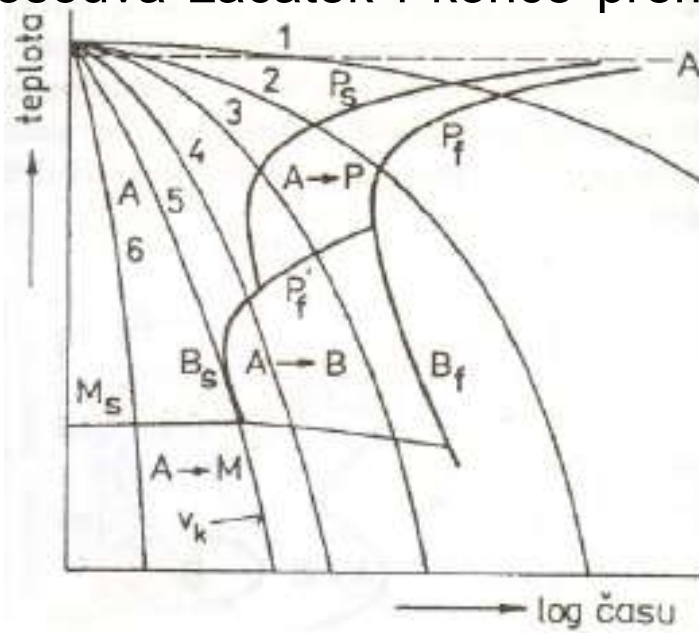


Zdroj:[3]

Schématické znázornění vlivu karbidotvorných prvků na tvar diagramu IRA pro jejich nízký (a) a vysoký (b) obsah.

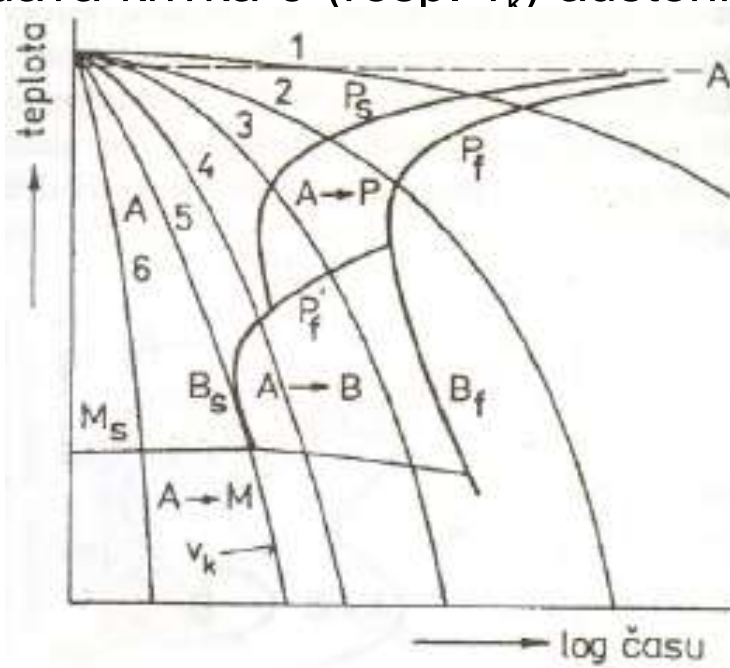
# Diagramy anizotermického rozpadu austenitu (diagramy ARA)

- Diagramy ARA udávají rovněž v souřadnicích teplota-čas počátky a konce jednotlivých přeměn austenitu, které byly získány při jeho plynulém ochlazování různými, v diagramu vyznačenými rychlostmi.
- Diagramy ARA je tedy nutné číst ve směru jednotlivých křivek ochlazování!
- Z obr. je patrné, že při relativně pomalém ochlazování eutektoidní oceli, křivky 1 a 2, se realizuje perlitická přeměna, přičemž s rostoucí rychlostí ochlazování se posouvá začátek i konce přeměny k nižším teplotám a kratším časům.



Zdroj:[3]

- Při dosažení určité rychlosti ochlazování (např. křivka 3) neproběhne perlitická přeměna do konce a zbylý austenit transformuje v oblasti bainitické, takže výsledná mikrostruktura je tvořena perlitem a bainitem (popř. martenzitem).
- Pro rychlosti ochlazování větší než odpovídá křivce 4 začíná přeměna austenitu bainitickou transformací a pod teplotu  $M_s$  pokračuje martenzitickou přeměnou.
- Se vzrůstající rychlostí ochlazování se zvětšuje podíl martenzitu a až od rychlosti větší než udává křivka 5 (resp.  $v_k$ ) austenit transformuje pouze na martenzit.



Zdroj:[3]

- Rychlost  $v_k$  (kritická rychlost kalení) je nejmenší rychlostí ochlazování, kdy je výsledná struktura tvořena pouze martenzitem a jistým podílem zbytkového austenitu.
- Vliv legujících prvku a podmínek austenitizace na polohu a tvar jednotlivých křivek diagramu ARA je obdobný jako u diagramu IRA.
- V přítomnosti přísad se zvětšuje tepelná hystereze, a proto je větší posun křivek v diagramech ARA směrem k nižším teplotám a delším časům, a to ve srovnání s diagramy IRA.

Zdroj:[3]



# Přeměny při popouštění oceli

- Popouštěním oceli se rozumí ohřev na teplotu nižší než  $A_1$ , následující zpravidla bezprostředně po zakalení, výdrž na teplotě (cca 2 hod.) a ochlazení vhodnou rychlostí. Obě nerovnovážné fáze, tj. martenzit a zbytkový austenit, procházejí změnami, jejichž průběh je závislý na složení oceli a na teplotě a době popouštění.
- Popouštění by mělo následovat ihned po zakalení (k zamezení nebezpečí popraskání zakalené součásti)
- Za rozhodující fázové přeměny při popouštění lze považovat precipitační rozpad tetragonálního martenzitu (M).
- Souběžně s rozpadem martenzitu dochází i k rozpadu zbytkového austenitu, k relaxaci vnitřních pnutí (zejména v intervalu teplot 300 - 450°C). Ve feritické fázi pak při vyšších teplotách dochází k zotavení až rekrystalizaci.
- Komplex výše uvedených fázových přeměn v uhlíkových ocelích s obsahem uhlíku vyšším než 0,25 hm. % se obvykle dělí do čtyř stadií popouštění, přičemž teplotní hranice mezi nimi nelze jednoznačně vymezit, neboť jednotlivé pochody se mohou

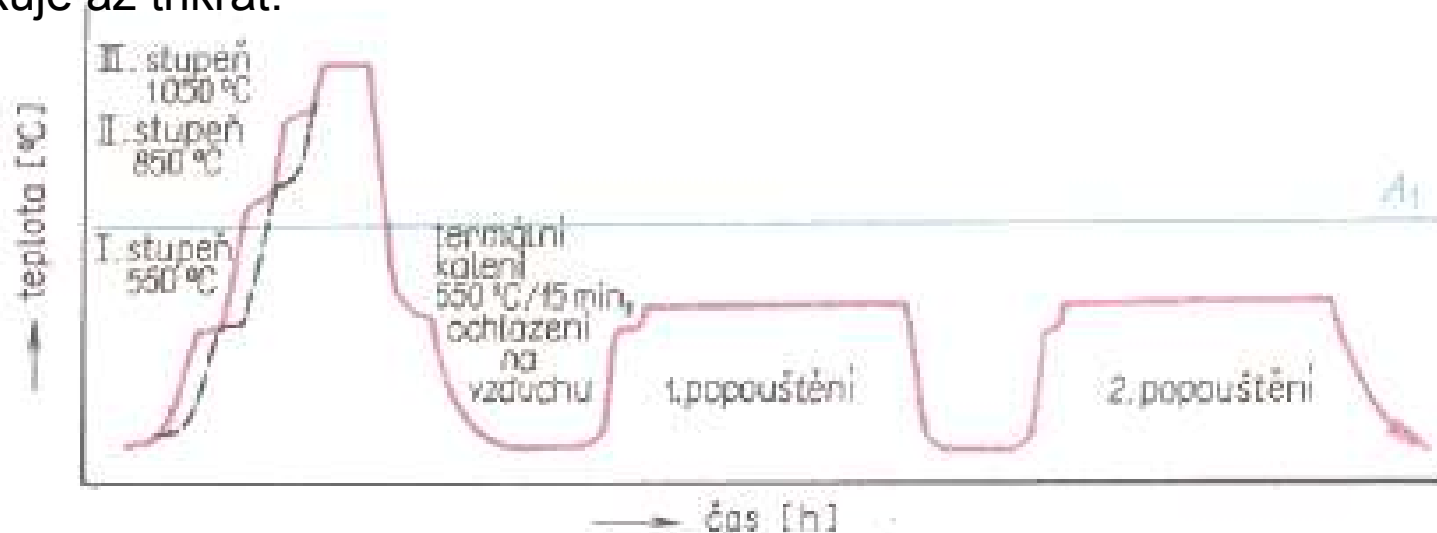
# Stadium popouštění

- Nejprve se uvolňuje uhlík ve formě přechodových karbidů – karbid  $\epsilon$  a martenzit se stává nízkouhlíkový – kubický.
- První stadium – do 200° C – vzniká popouštěný – kubický martenzit, doprovázený mírným snížením tvrdosti, zmenšením objemu a snižováním vnitřního pnutí.
- Druhé stadium – 200 až 300° C – rozpad zbytkového martenzitu na strukturu bainitického typu. Dochází k zvětšení měrného objemu oceli.
- Třetí stadium – nad 250° C – vzniká rovnovážný karbid  $\text{Fe}_3\text{C}$  a nízkouhlíkový martenzit se mění v rovnovážný tuhý roztok  $\alpha$  ferit. Částice cementitu mají tyčinkovitou morfologii, nad 400°C globulovitou. Z vlastností se mění především tvrdost, houževnatost, tvárnost a tažnost. Výsledkem pochodů je feriticko cementitická struktura sorbit.
- Čtvrté stadium – nad 500° C – postupné hrubnutí částic cementitu, rekrytalizace a hrubnutí feritického zrna.

Zdroj:[1]

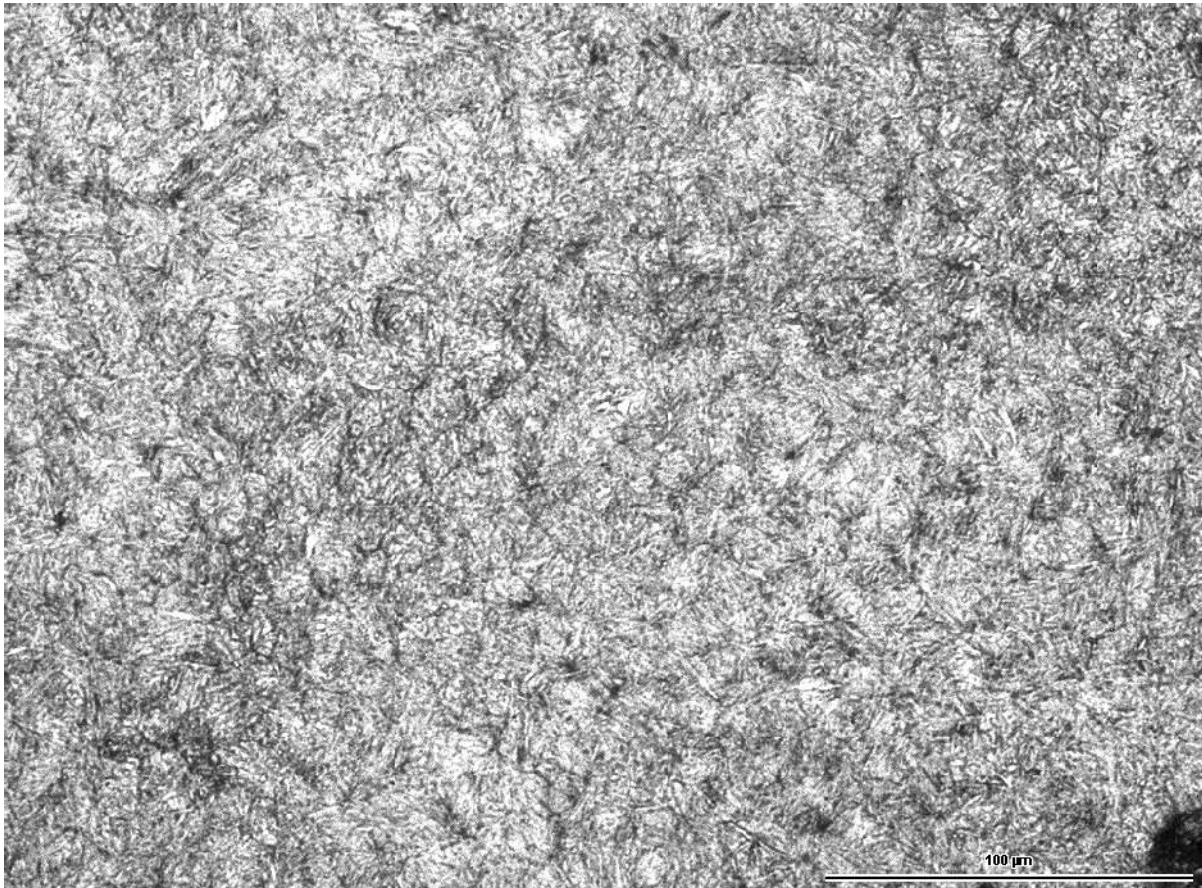
# Tepelné zpracování rychlořezné oceli

Ohřev se zpravidla děje ve dvou nebo třech stupních vzhledem k tomu, že rychlořezná ocel je citlivá na prudký ohřev. Kalí se podle velikosti průřezu součásti buď na klidném nebo proudícím vzduchu, nebo do oleje. Pouze oceli s vysokým obsahem W a Co (ČSN 19 855) se kalí jen na vzduchu. Výhodné je použít termální kalení do lázně teplé asi 500 °C s následným ochlazením na klidném vzduchu. Popouštěcí teploty bývají podle druhu oceli mezi 540 až 590°C. Po popouštění se ochlazuje zásadně na vzduchu. Při prvním popouštěcím cyklu dochází k popuštění primárně vzniklého martenzitu a k precipitaci karbidů. Při chladnutí z této teploty dojde k rozpadu části zbytkového austenitu na martenzit. Proto v některých případech se popouštění opakuje až třikrát.



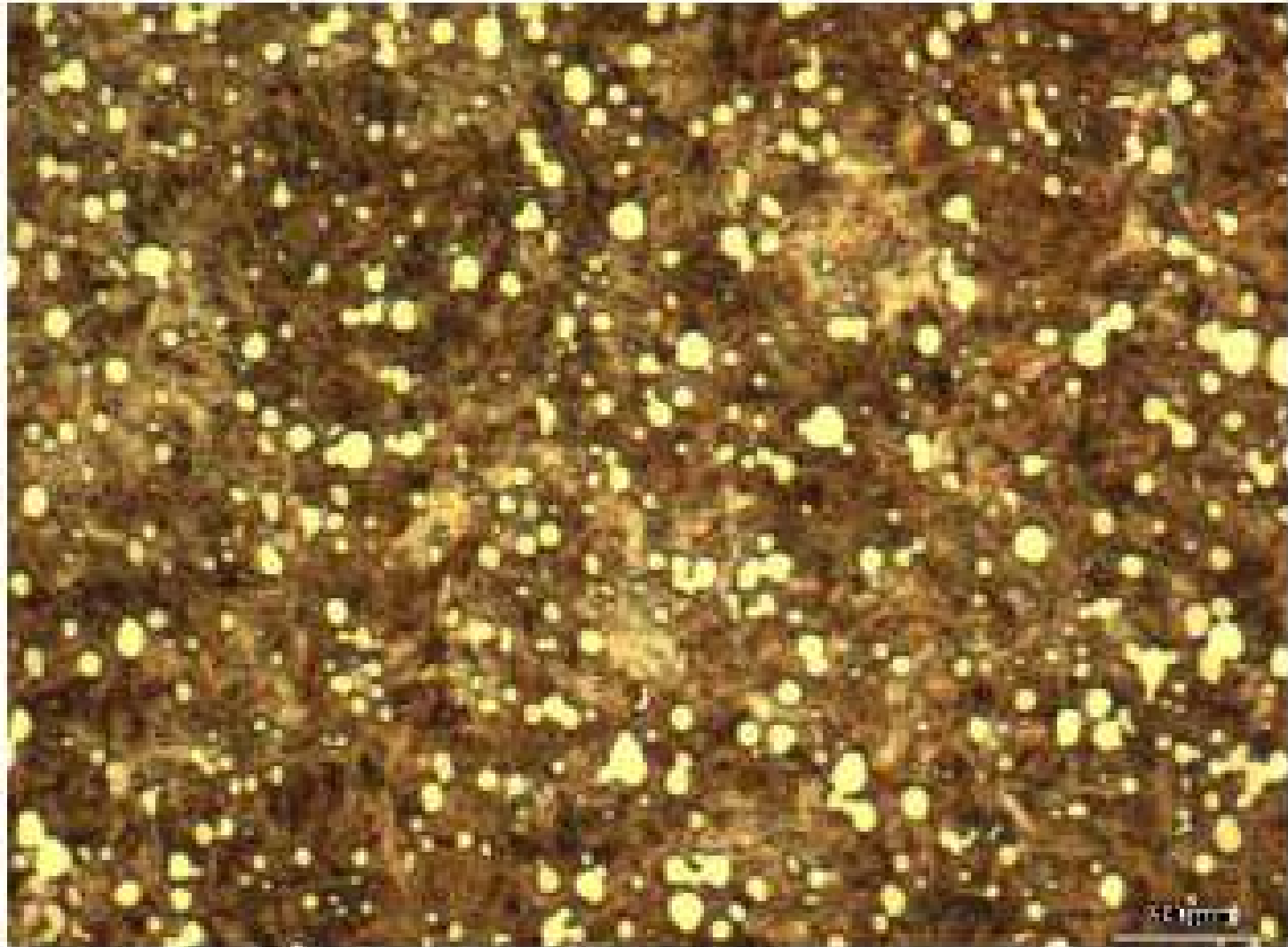
Zdroj:[5]

- Sorbit je houževnatější , ale méně tvrdý než martenzit.
- Při popuštění slitinových ocelí na vyšší teploty se může objevit **sekundární tvrdost**.
- U ocelí s přísadou Cr, Mn, Cr-Ni při pomalém ochlazení při teplotě 450 – 600 °C se může objevit **popouštěcí křehkost**.

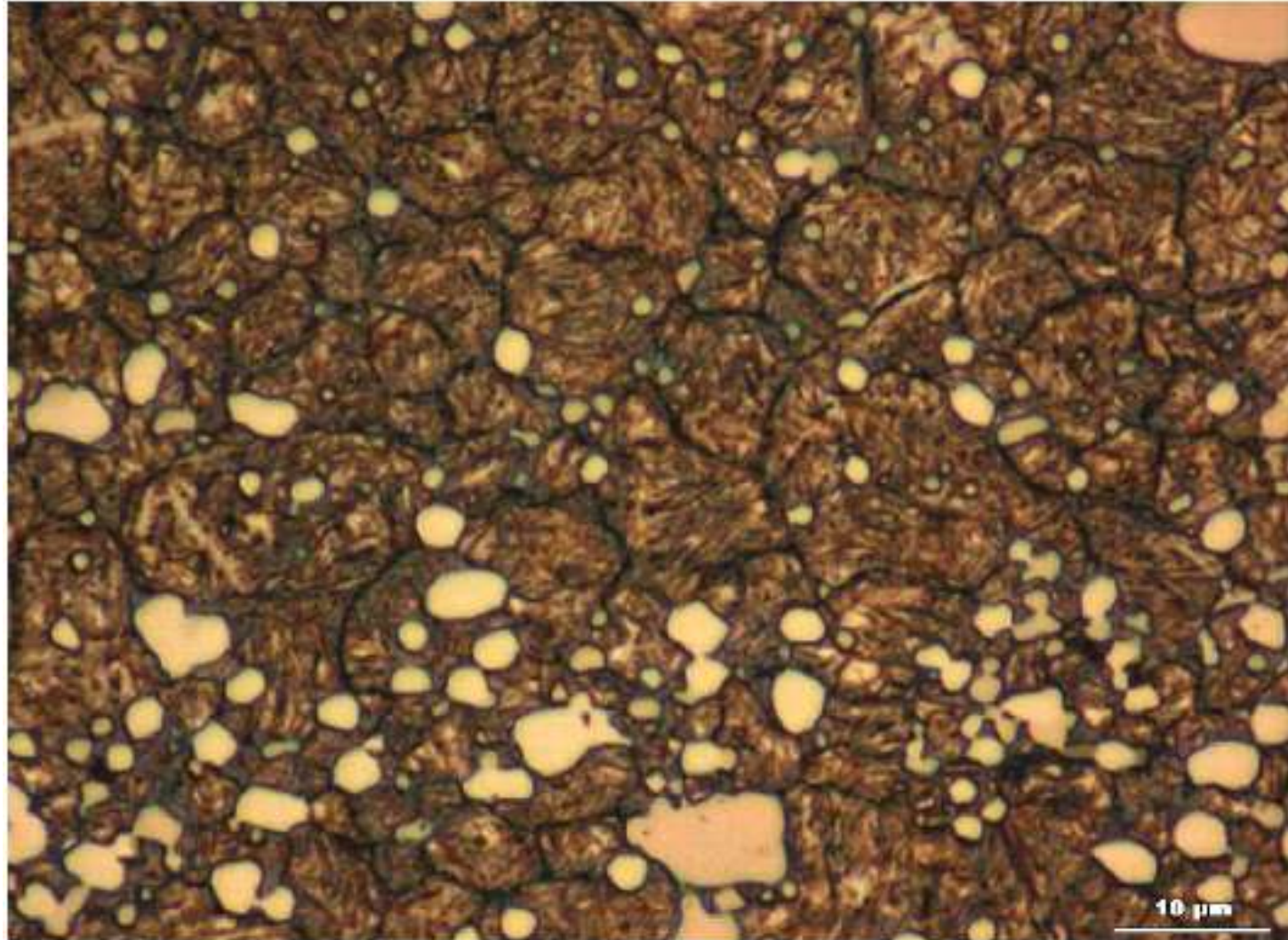


Zdroj:[1]

# Prášková ocel - zušlechtěno



# Nevhodné tepelné zpracování



Překročení kalící teploty o 20-30°C způsobí nevhodný růst zrna.



# Popouštěcí křehkost

- Reálné hodnoty houževnatosti některých ocelí mohou být výrazně nižší, než by odpovídalo obecné tendenci jejich růstu s rostoucí teplotou popouštění. Hovoříme pak o popouštěcí křehkosti, přičemž jednotlivé oblasti jejího výskytu jsou znázorněny na obr.
- Rozvoj popouštěcí křehkosti v oceli zpravidla vede k poklesu hodnot vrubové a lomové houževnatosti bez změny pevnosti a tažnosti.
- Zvýšení tranzitní teploty, zvýšení náchylnosti ke koroznímu praskání, k vodíkové křehkosti atd.
- Při rychlém ochlazení se neprojeví.
- Sklon k popouštěcí křehkosti snižuje přísada Mo a W.

Zdroj:[3]



- Podle výšky popouštěcí teploty, která má rozhodující vliv na rozsah strukturních změn a změn mechanických vlastností, rozeznáváme:
- **Popouštění na nízké teploty** (do cca 300°C) – u nástrojových ocelí, cíl: snížit vnitřní pnutí, podíl ZA a stabilizovat rozměry při zachování vysoké tvrdosti.
- **Popouštění na vysoké teploty (zušlechťování)** – obvykle u konstrukčních ocelí v rozmezí teplot 400 - 600°C k dosažení optimální kombinace mezi pevností a kluzu, houževnatostí a plasticity. Tuto kombinaci umožňuje sorbitická struktura (vzniká ve 3., příp. 4. stadiu popouštění).

Zdroj:[1]

# LITERATURA

- [1] Kraus V.: Tepelné zpracování a slinování. ZČU v Plzni.
- [2] Ryš P., Cenek M., Mazanec K., Hrbek A.: Nauka o materiálu I. 4. svazek – Železo a jeho slitiny. Praha 1975.
- [3] Ptáček a kolektiv: Nauka o materiálu II. Brno. 2002.
- [4] Kříž A.: Rozpad austenitu. Podklady pro přednášky ze SMA. 2005.
- [5] DRIML B.: Kalení a popouštění. <http://www.elitalycea.wz.cz>