



Nové možnosti rozvoje vzdělávání na Technické univerzitě v Liberci

Specifický cíl A3:Tvorba nových profesně zaměřených studijních programů

NPO_TUL_MSMT-16598/2022



Předmět: Nauka o materiálu

Přednáška č. 4: Tepelné zpracování kovových materiálů na bázi Fe-C

doc. Ing. Pavlína Hájková, Ph.D.

Cíl přednášky

Cílem přednášky je seznámit studenty s jednotlivými typy úprav vlastností materiálů na bázi Fe-C a se strukturálními změnami, které se při úpravách dějí.

Obsah

1. Zpracování ocelí a litin
2. Tepelné zpracování
3. Fázové přeměny
4. Transformační diagramy – IRA, ARA
5. Kalení, popouštění, žíhání
6. Další druhy zpracování

Zpracování ocelí a litin

- Tepelné zpracování (TZ)
 - žíhání, kalení, popuštění
- Povrchové kalení
- Tepelně mechanické zpracování (TMZ)
- Chemicko-tepelné zpracování (CHTZ)
 - cementace, nitridace

Proč TZ???

po TZ dochází k



Změna struktury

a tím změna vlastností – tvrdost, pevnost, houževnatost...

Změna struktury ocelí

souvisí s fázovými přeměnami po tzv. austenitizaci (pomalý ohřev do oblasti austenitu) a řízeném ochlazení

K tomu je nutno znát:

- Fázové přeměny v tuhém stavu u ocelí
- Transformační diagramy ocelí IRA, ARA

Fázové přeměny v tuhém stavu u ocelí

➤ Spojeny se změnou mřížky

1) Austenitizace

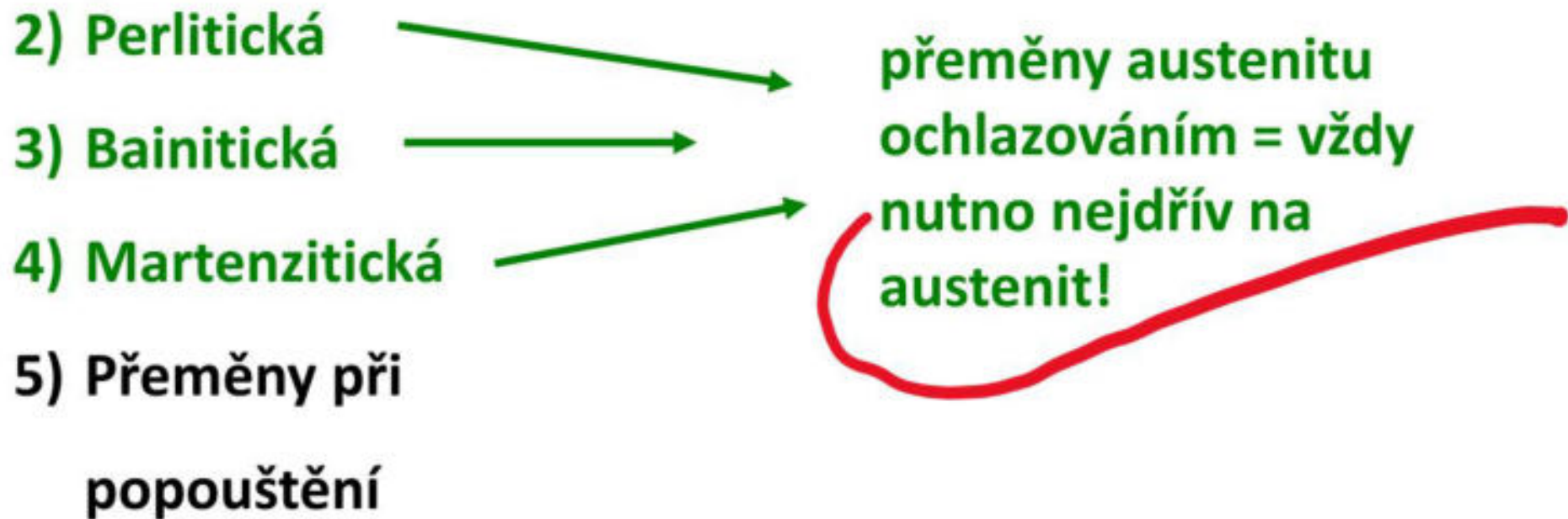
2) Perlitická

3) Bainitická

4) Martenzitická

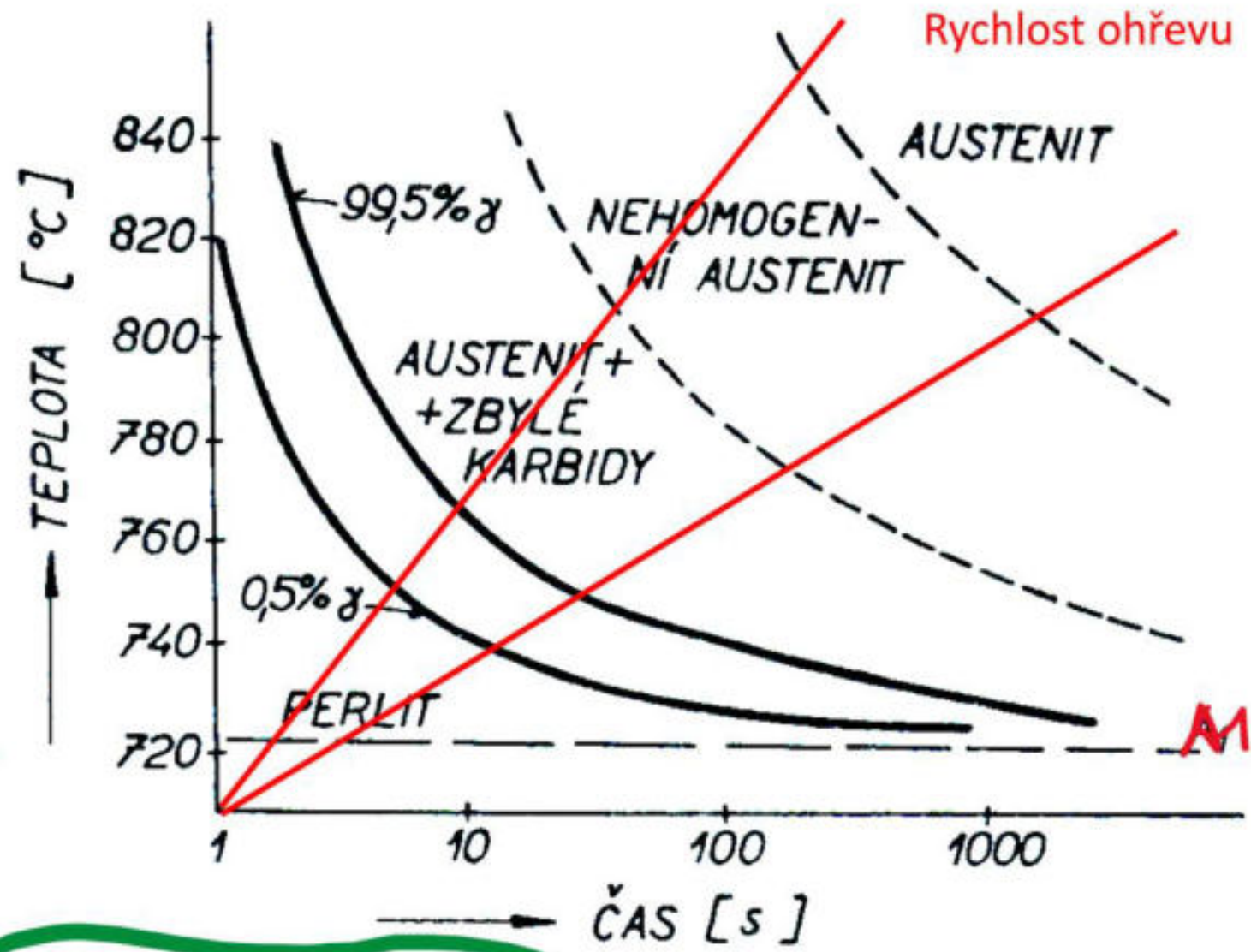
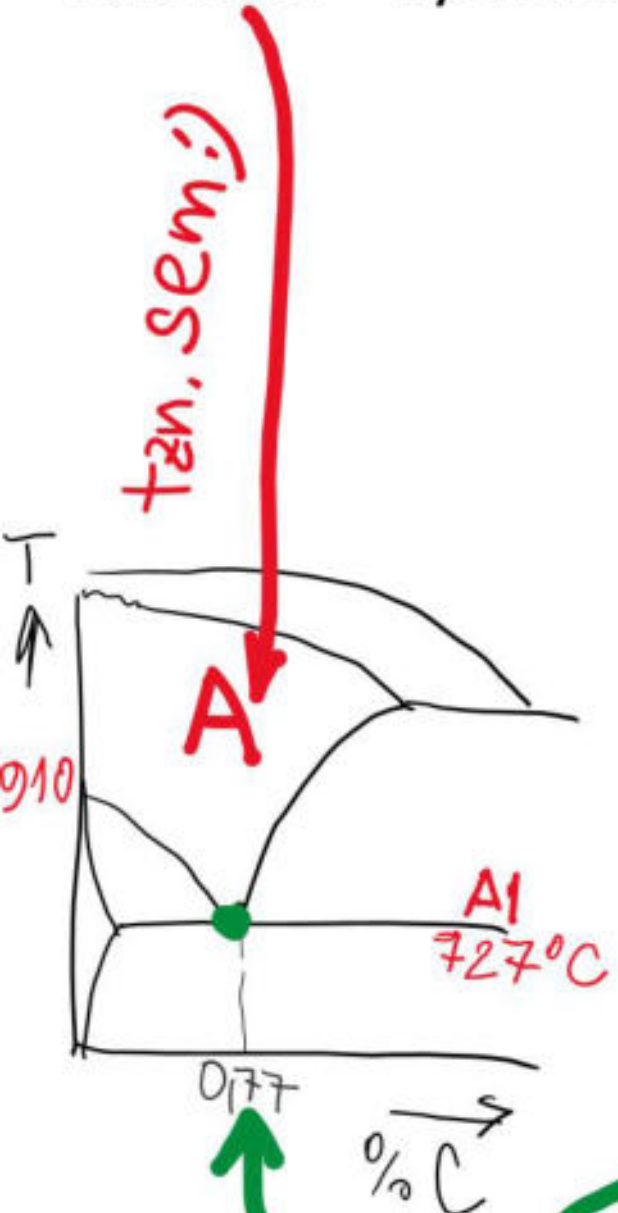
5) Přeměny při
popouštění

přeměny austenitu
ochlazováním = vždy
nutno nejdřív na
austenit!



Co je Austenitizace?

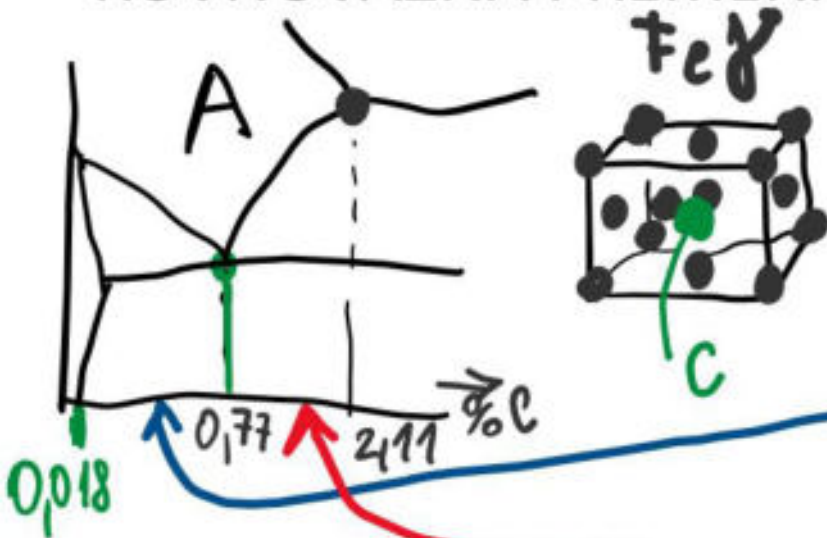
= přeměna heterogenní struktury v homogenní austenit
Austenit = výchozí struktura pro většinu tepelného zpracování



Austenitizační diagram eutektoidní oceli s lamelárním perlitem

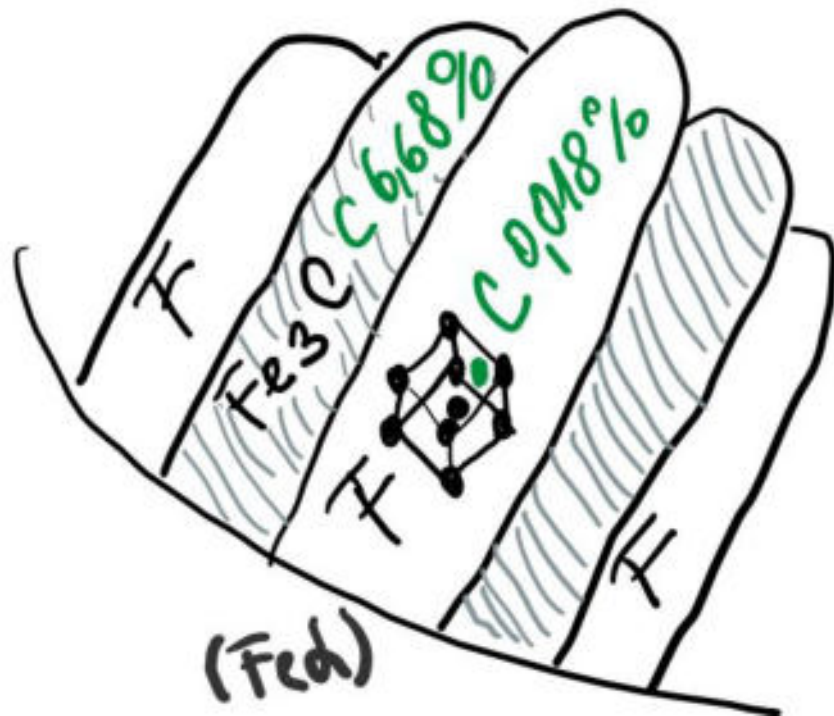
PERLITICKÁ PŘEMĚNA (= Ferit + Cementit)

= ROVNOVÁŽNÁ PŘEMĚNA – běží dle metastabilního diagramu Fe-C



Do austenitu s Fe γ se vejde mnohem víc C (až 2,11%) než do feritu s Fe δ

- Na hranici austenitových zrn vznikne zárodek - lamelka (F u podtektoidní a C u nadeutektoidní), okolí je ochuzeno – podmínky pro další lamelu druhé fáze



PERLIT = EUTEKTIKUM
= Lamely Ferit + Cementit


Co se stane, když chladím rychleji?

Fe i C potřebují pro difúzi energii, tzn. pomalé chladnutí, čas....

je větší difunduje **POMALEJI**

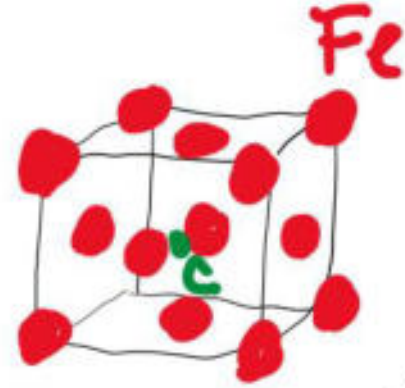
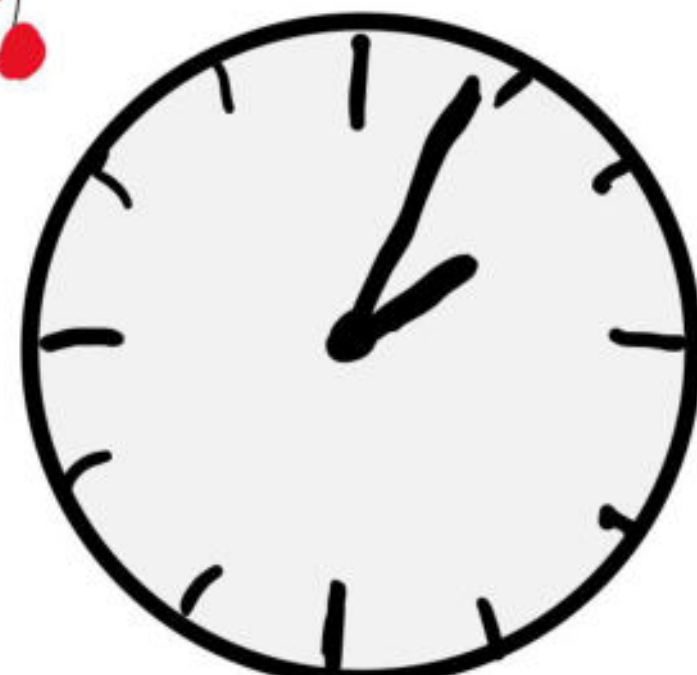
je menší difunduje **SNAŽI**

Fe

“  ”

Fe

Austenit
int. TR C v Fe γ



Difúzně x bezdifúzně

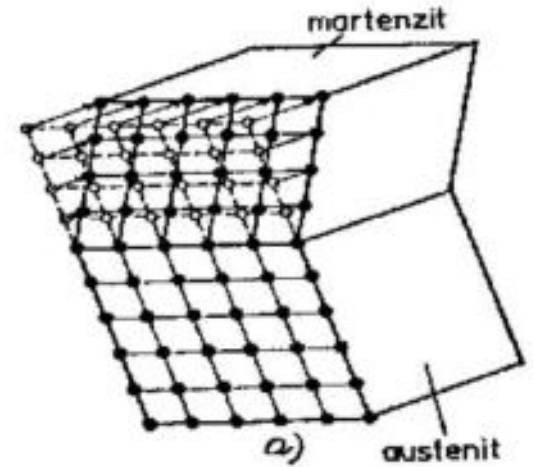
střih

Co se týče Fe mění se mřížka

Kubická plošně
centrovaná

Kubická prost.
centr.

$Fe\gamma$ → $Fe\delta$



*V závislosti na
rychlosti
chlazení:*

- **Difúzí – Perlit**
- **Střihem – Bainit**
- **Střihem - Martenzit**

Co se týče C

- **Difunduje u Perlitu do Fe_3C lamel**
- **Difunduje u Bainitu do Fe_3C útvarů**
- **Nedifunduje u Martenzitu - uvězněn
- způsobuje pnutí**



BAINITICKÁ PŘEMĚNA

= PŘEŽENEME-LI PODCHLAZENÍ = nerovnovážná struktura

Přeměnou přechlazeného austenitu za teplot $\approx 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ až M_s

➔ nelamelární **feriticko – karbidická směs – bainit**.

- **bainitická přeměna** - přeměna plošně centrované mřížky Fe γ na prostorově centrovanou Fe α stříhem. C difunduje do drobných karbidických útvarů.
- Částečně odpovídá martenzitické (bezdifúzní (Fe)) i perlitické (difúzní (C)) přeměně
- Základní typy - horní bainit (teplota pod 500 do 250 $^{\circ}\text{C}$)
- dolní bainit (teploty cca 250 $^{\circ}\text{C}$ - do M_s)

Bainit

Nedosahuje tvrdosti martenzitické struktury, houževnatost je však výrazně vyšší. V porovnání s lamelárními strukturami perlitického typu jsou pevnostní vlastnosti bainitu vyšší.

Struktura bainitu

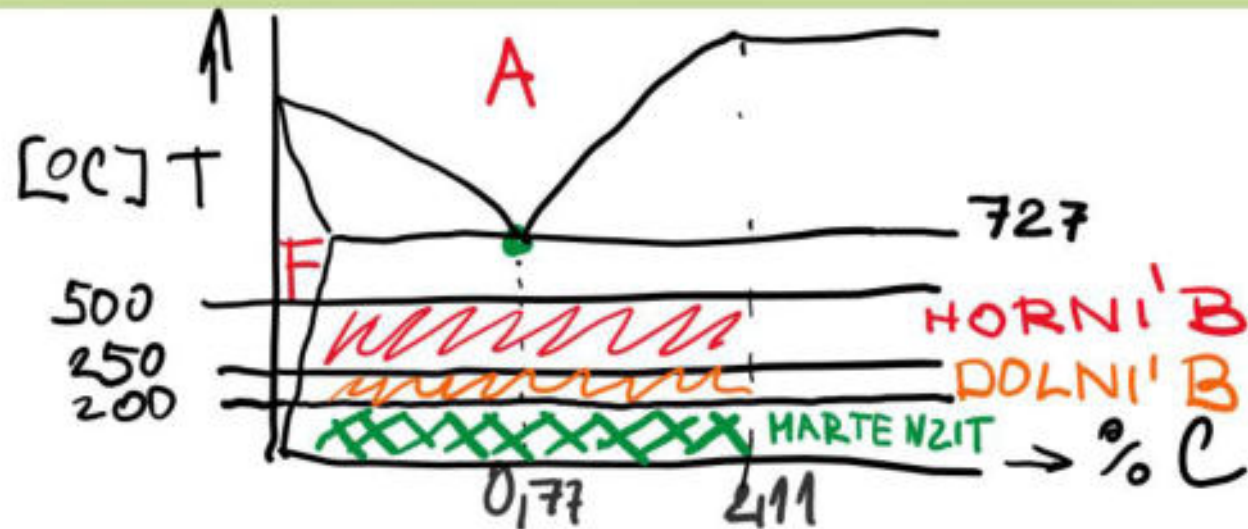
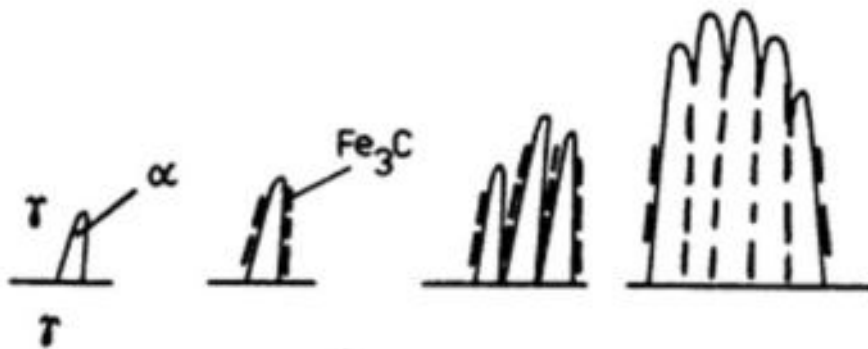
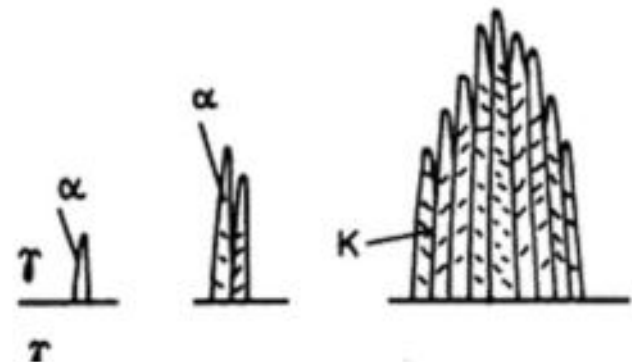


Schéma tvorby bainitu ve středně uhlíkové oceli: a) vznik horního bainitu, b) vznik dolního bainitu; α – bainitický ferit; γ austenit; K – karbid ϵ , popř. cementit



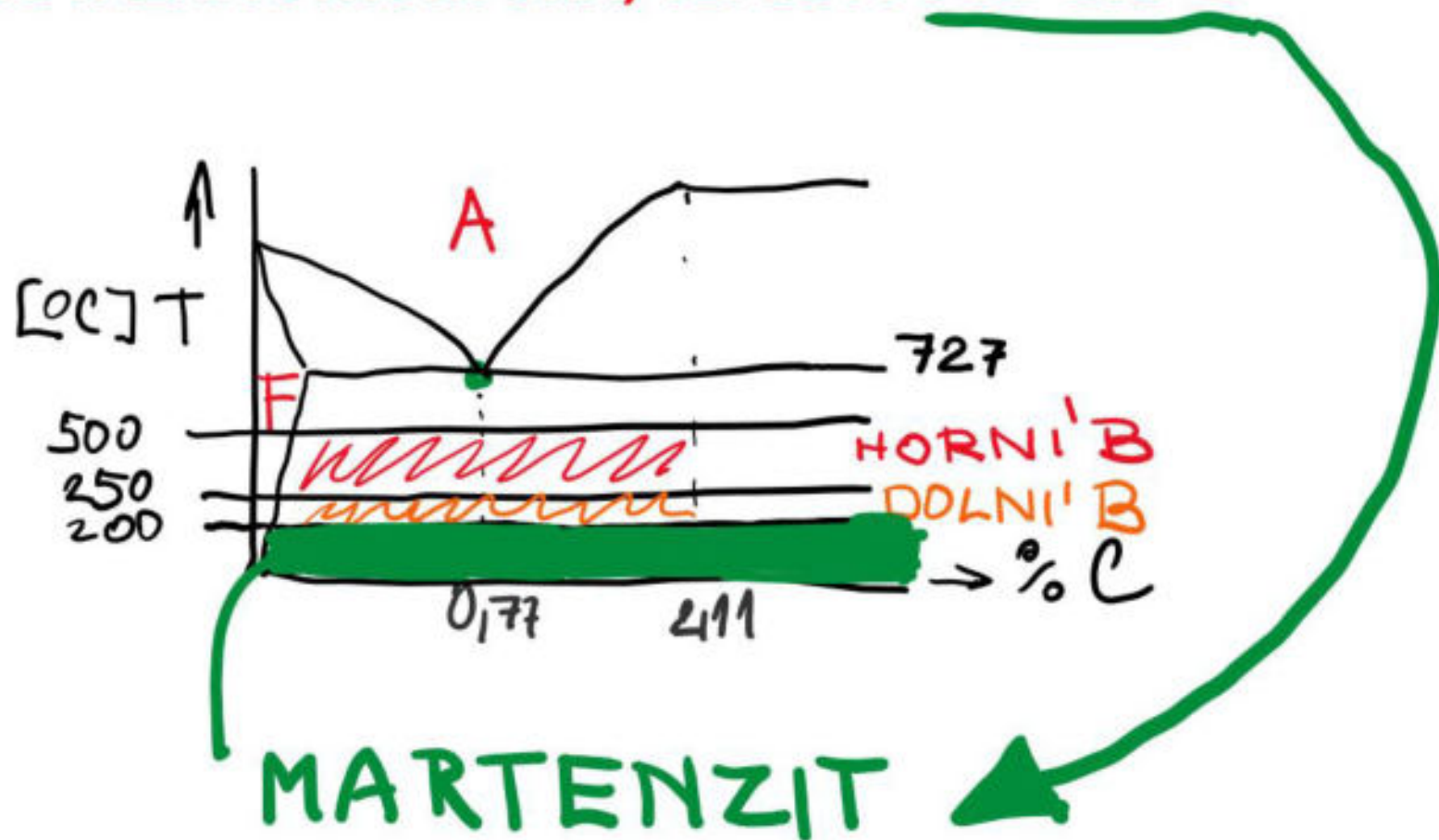
Horní bainit - tvoří svazky hrubších jehlic bainitického feritu, s podélně uspořádanými částicemi cementitu, které jsou vyloučeny hlavně na povrchu jehlic.



Dolní bainit - tvoří svazky tenkých desek bainitického feritu, které obsahují velké množství jemných karbidů, vyloučených podél určitých rovin bainitického feritu.

MARTENZITICKÁ PŘEMĚNA

= SILNĚ NEROVNOVÁŽNÁ STRUKTURA, TEPLoty POD 200 °C



(vždy obsahuje i
zbytkový austenit)

MARTENZITICKÁ PŘEMĚNA

= **SILNĚ NEROVNOVÁŽNÁ STRUKTURA, TEPLoty POD 200 °C**

- Bezdifúzní přeměna z austenitu – vzniká nerovnovážený **přesycený tuhý roztok uhlíku v Fe α = martenzit** – vysoká tvrdost, ale i křehkost
 - Vznik STŘIHOVÝM MECHANISMEM
 - Potřebuje změnu teploty = neprobíhá za jedné tepl.– T_{M_S} , T_{M_F} (P i B můžeme zchladiť na danou teplotu a při té proběhne přeměna)
 - Chemické složení martenzitu = chem. složení výchozího austenitu
 - Krystalová mřížka martenzitu je tetragonální prostorově středěná
- Přeměna tak rychlá, že intersticiální atomy uhlíku zůstanou uzavřené v mřížce „Fe α “, kam se jich ale tolik běžně nevejde a tak se mřížka deformuje na tetragonální a C působí napětí a tím zpevnění. Tzn. čím více C tím vyšší pevnost a tvrdost martenzitu

Transformační diagramy – IRA, ARA

TTT diagramy – Temperature – Time - Transformation

- průběh přeměny přechlazeného austenitu
- udávají vliv teploty a času na průběh přeměny.
- **!!! platí pro ocel určitého chemického složení** a pro určité podmínky austenizace (velikost zrna, homogenita austenitu, atd.).
- Obsahují údaje o perlitické, bainitické a martenzitické přeměně austenitu.

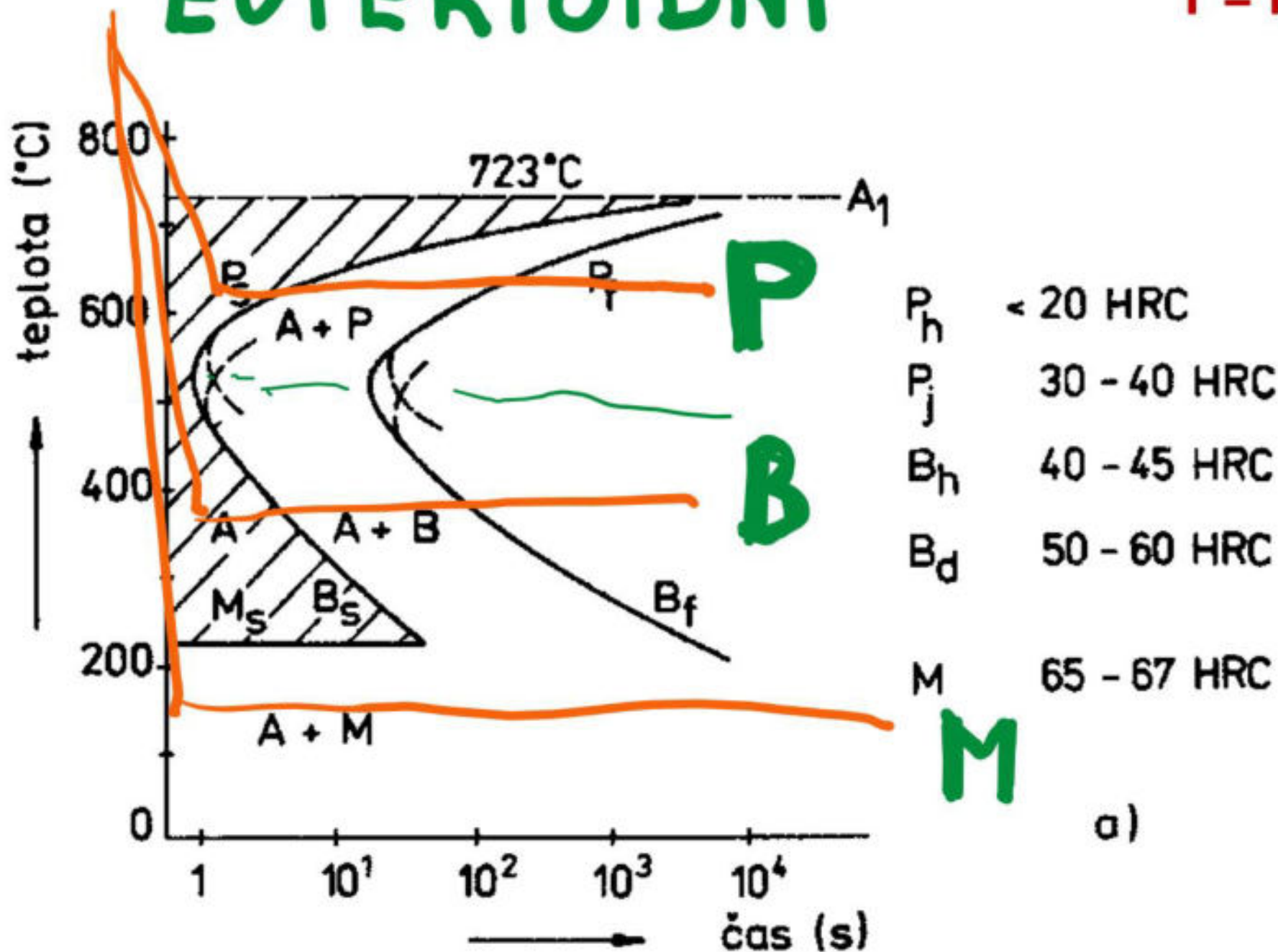
I. Izotermické diagramy – IRA – udávají dobu přeměny austenitu za izotermních podmínek ($T = \text{konst.}$).

II. Anizotermické diagramy – ARA – udávají doby potřebné k přeměně austenitu za různých ochlazovacích rychlostí.

IRA – DIAGRAMY = *izotermický rozpadu austenitu oceli*

EUTEKTOIDNÍ

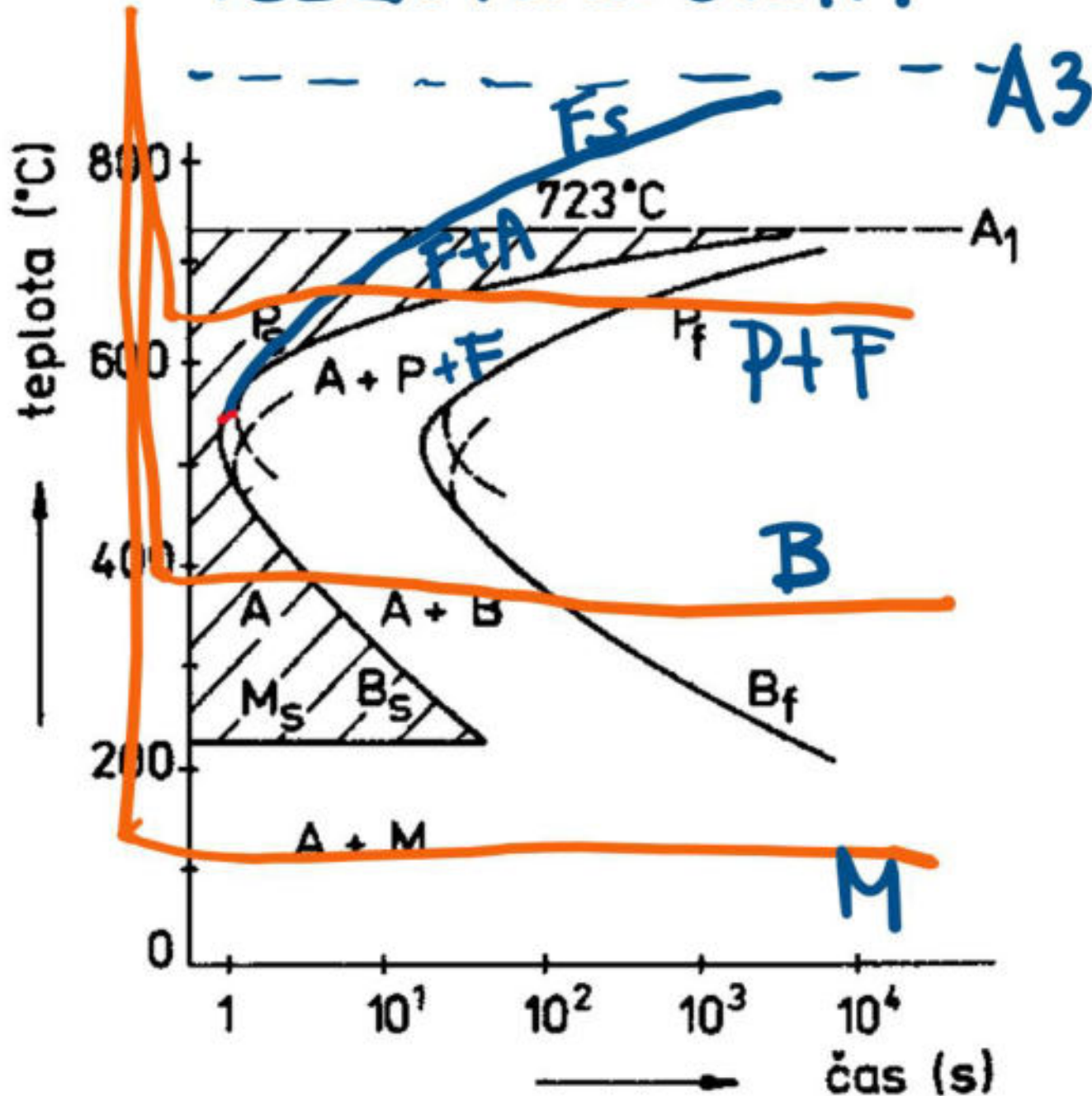
T = konst.



IRA – DIAGRAMY = *izotermický rozpadu austenitu oceli*

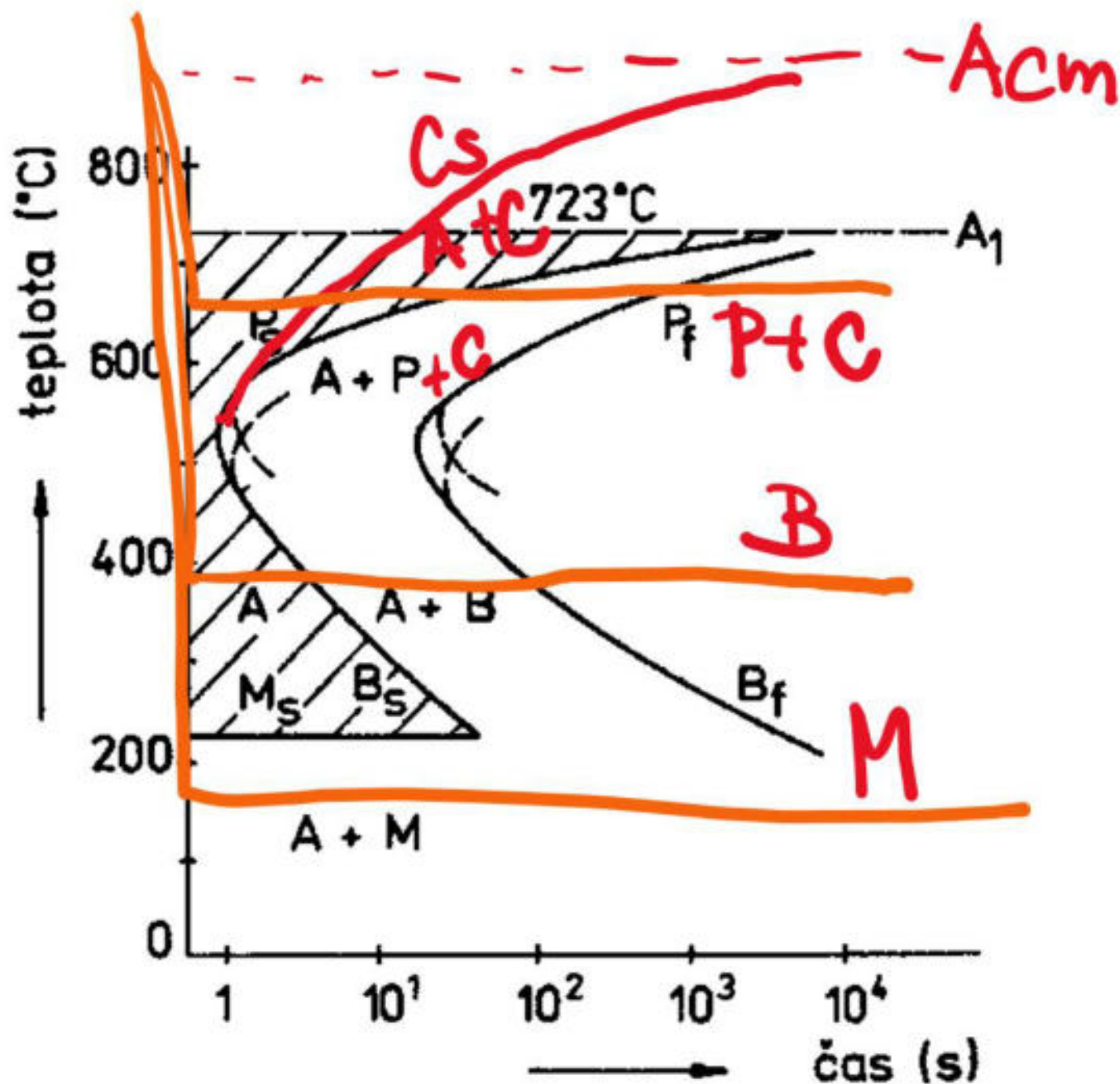
PODEUTE KTOIDNÍ

T = konst.



IRA – DIAGRAMY = *izotermický rozpadu austenitu oceli* **NADEUTEKTOIDNÍ**

T = konst.



Vliv karbidotvorných prvků

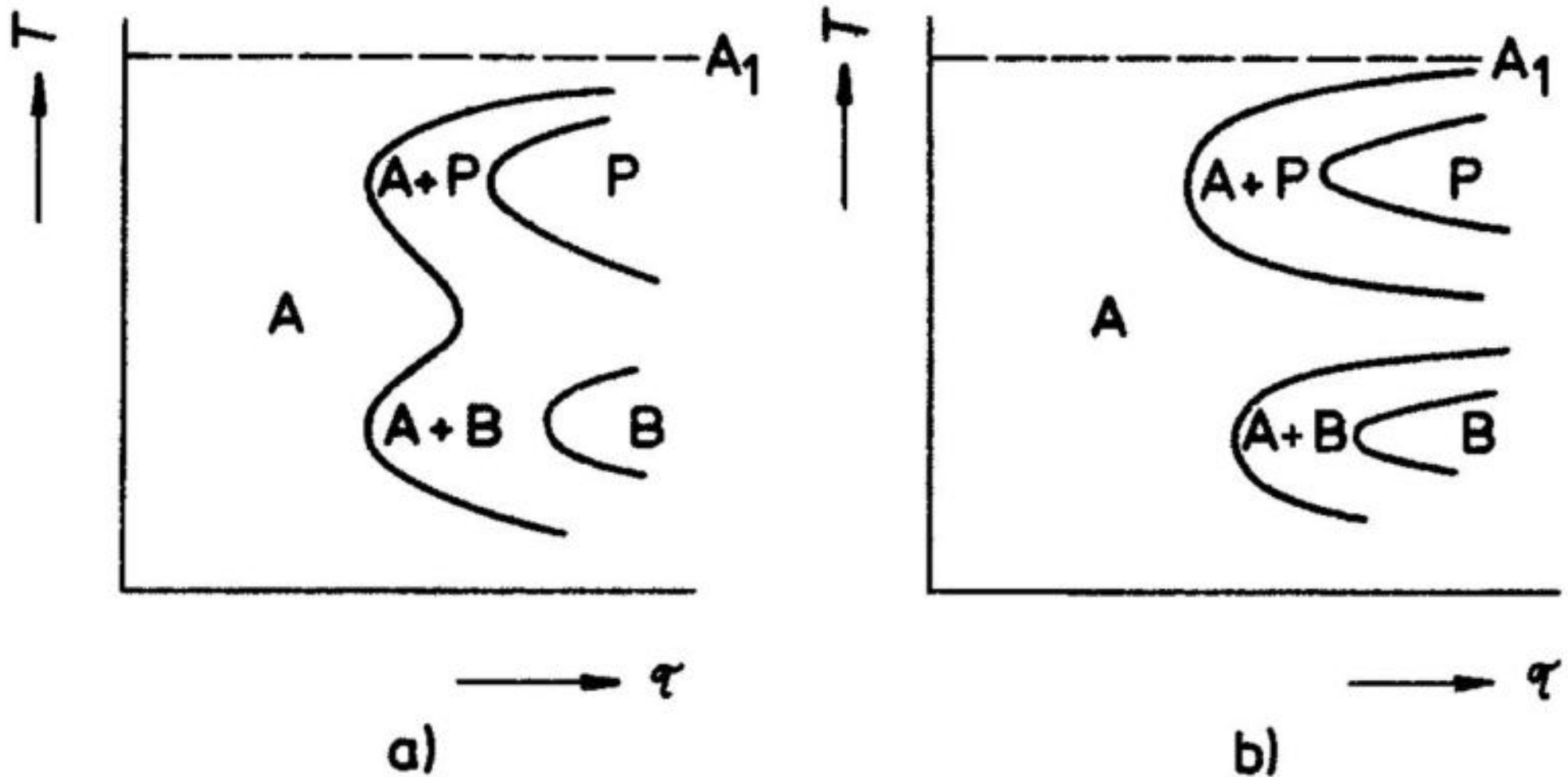


Schéma vlivu karbidotvorných prvků na tvar diagramu IRA: a) nízký obsah přísady, b) vysoký obsah přísady

Opakování pojmů

Bainit, B

Je metalografický název pro směs feritu a cementitu. Vzniká difúzní a bezdifúzní přeměnou austenitu v oblasti mezi perlitickou a martenzitickou přeměnou. Cementit v bainitu na rozdíl od perlitu, je jemně dispergován na hranicích feritických zrn.

Martenzit, M

Je přesycený metastabilní tuhý roztok uhlíku, případně i jiných prvků v Fe_{α} , který vzniká bezdifúzní přeměnou austenitu zpravidla při ochlazování pod teplotu M_S .

P_S – perlit start

Je počátek přeměny (transformace) austenitu na perlit.

P_f – perlit finish

Je konec přeměny austenitu na perlit.

Opakování pojmů

B_S – *bainit start* - Je počátek přeměny austenitu na bainit.

B_f – *bainit finish* - Je konec přeměny austenitu na bainit.

Obdobně F_S a C_{II_S} znamenají počátek, F_f a C_{II_f} konec přeměny austenitu na ferit, resp. Cementit.

M_S – *martenzit start* - Je teplota počátku přeměny austenitu na martenzit.

M_f – *martenzit finish* - Je teplota konce přeměny austenitu na martenzit.

Austenit zbytkový, A_Z - Je austenit, který zůstava po kalení resp. Jiném způsobu ochlazování nepřeměněn.

Ocel - Je slitina železa, uhlíku a několika dalších prvků. Obsahuje do 2,11 % uhlíku.

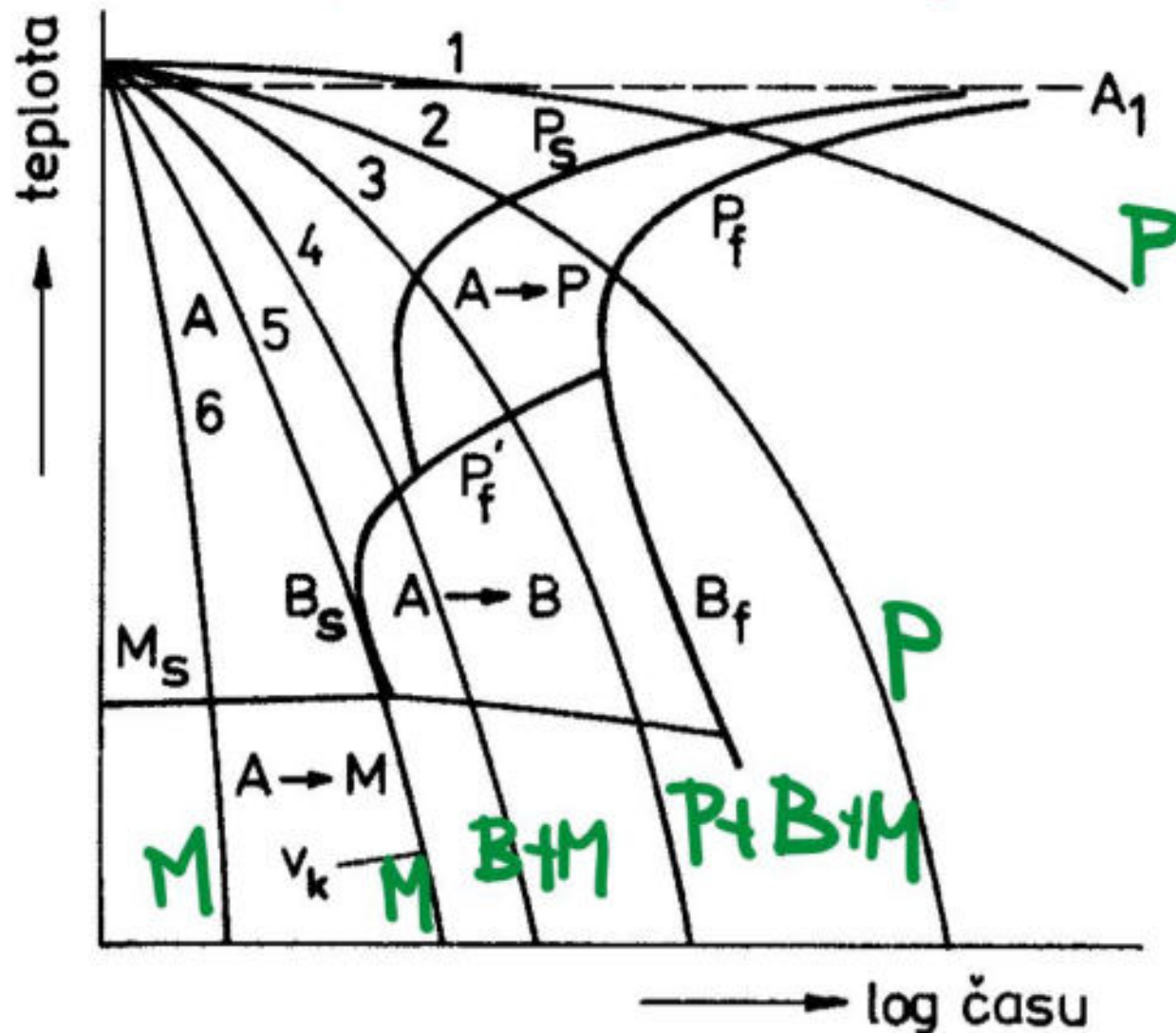
Litina - Je slitina železa, uhlíku a několika dalších prvků, přičemž obsah uhlíku je vyšší než 2,11 %.

ARA – DIAGRAMY = anizotermický rozpadu austenitu oceli

plynulé ochlazování austenitu různou rychlostí

- ve srovnání s IRA jsou složitější, protože výsledná struktura oceli může být tvořena směsí produktů přeměn, které probíhají za různých teplot.

EUTEKTOIDNÍ

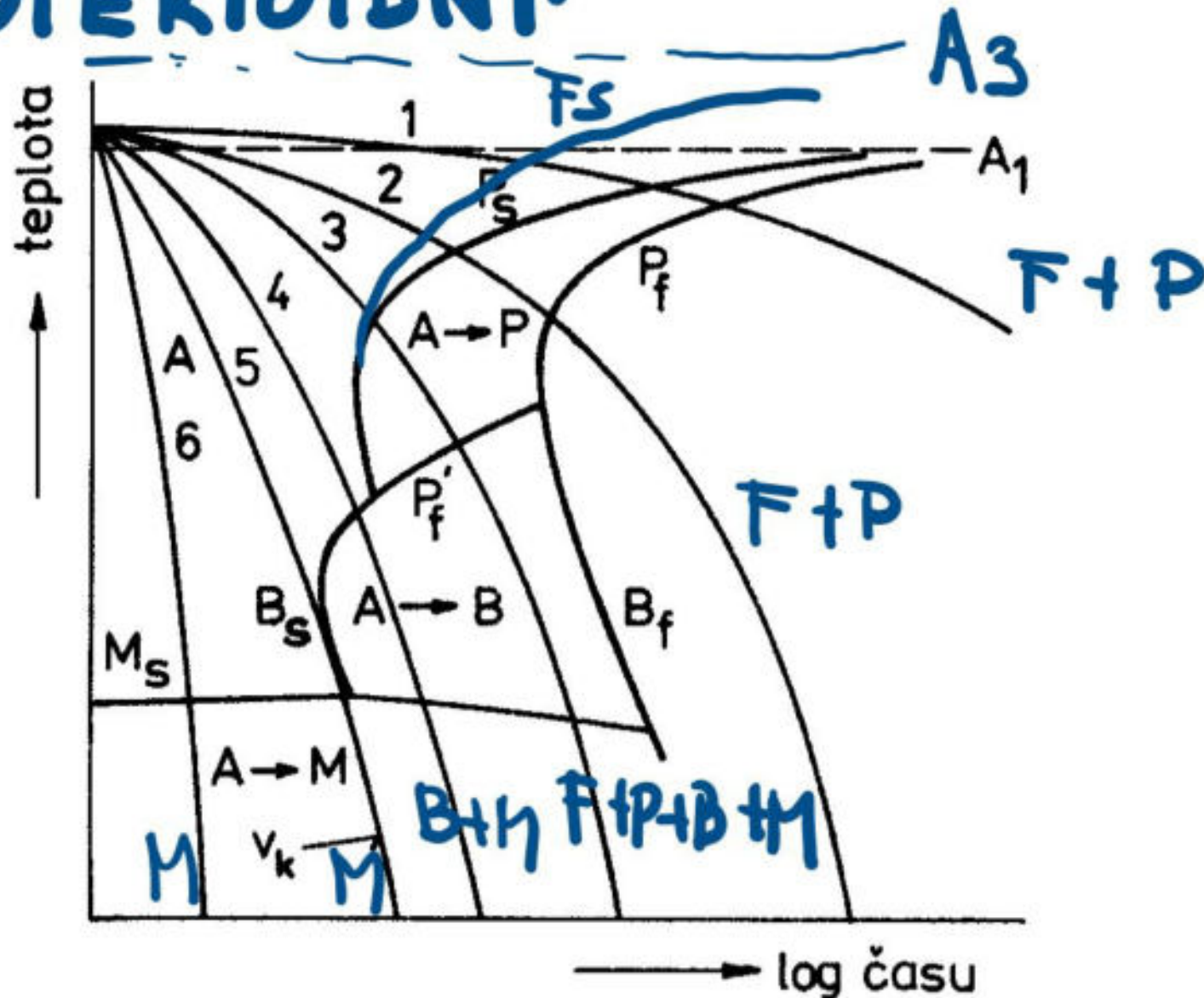


ARA – DIAGRAMY = anizotermický rozpadu austenitu oceli

plynulé ochlazování austenitu různou rychlostí

- ve srovnání s IRA jsou složitější, protože výsledná struktura oceli může být tvořena směsí produktů přeměn, které probíhají za různých teplot.

PODEUTEKTOIDNÍ

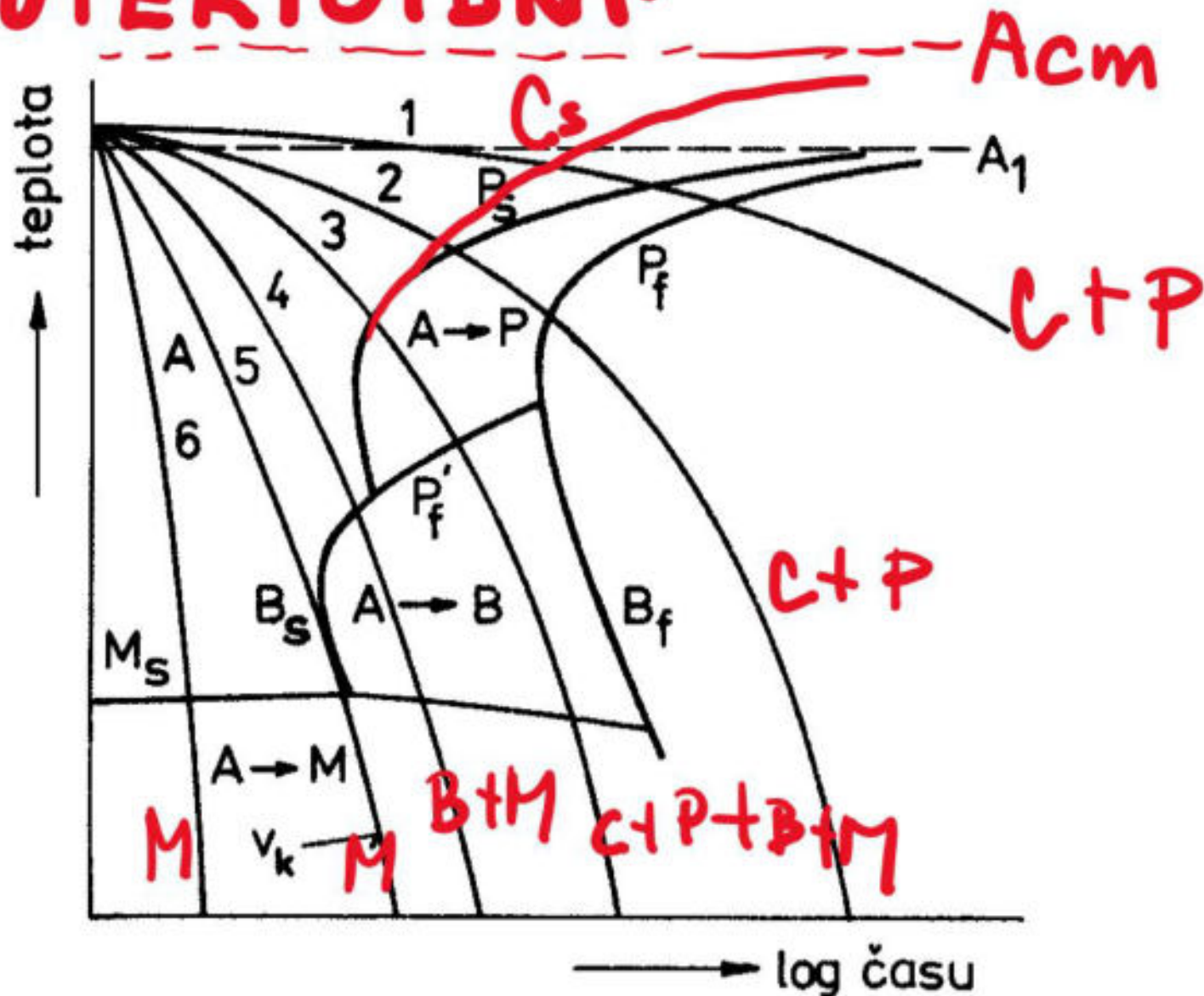


ARA – DIAGRAMY = anizotermický rozpadu austenitu oceli

plynulé ochlazování austenitu různou rychlostí

- ve srovnání s IRA jsou složitější, protože výsledná struktura oceli může být tvořena směsí produktů přeměn, které probíhají za různých teplot.

NADEUTEKTOIDNÍ



TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ (TZ)

TZ – mění vlastnosti ocelí **bez** změny chemického složení

Legování – mění vlastnosti ocelí změnou chemického složení

TZ = teplotní zpracování = **ohřev, výdrž, vedené ochlazování**

Ohřev při austenitizaci **pomalý** (při rychlém se zvyšuje $T_{\text{aust.}}$),
legované oceli nutno ohřívat ještě pomaleji –horší tepelná vodivost
díky legurám

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ (TZ)

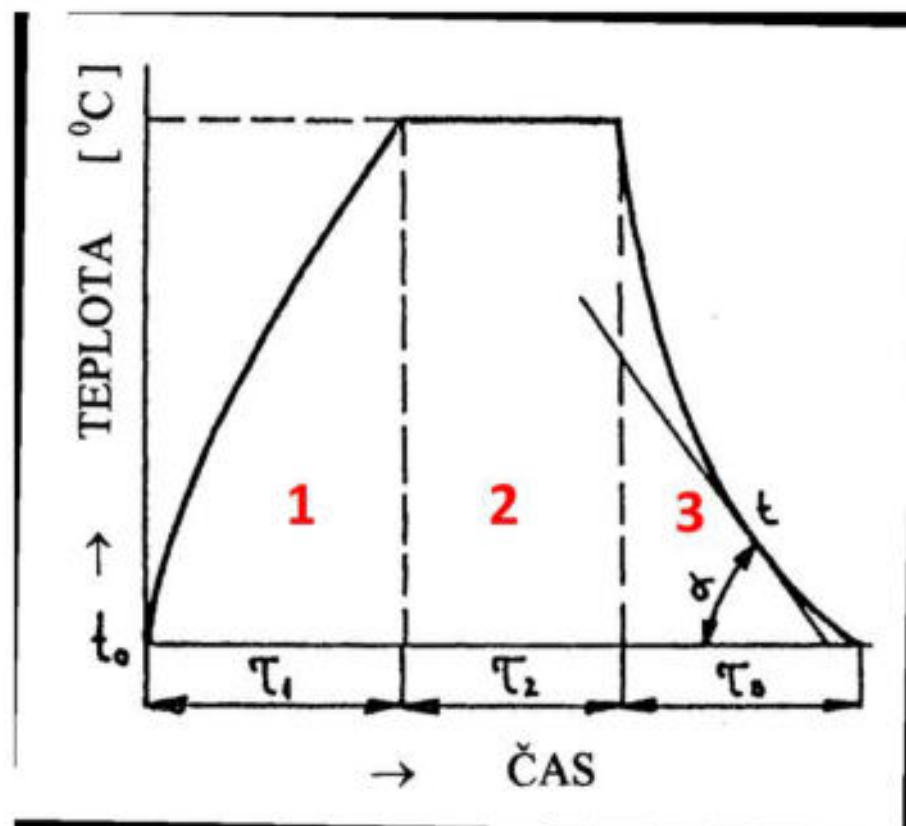
Vlastnosti ocelí závisí nejen na:

- chemickém složení
- na struktuře

Požadovanou strukturu lze dosáhnout TZ = řízenými tepelnými cykly. Při nich probíhají **fázové přeměny** –

austenitizace, perlitická, bainitická, martenzitická a přeměny při popouštění

TZ



- **1 ohřev** - rovnoměrný - přestup tepla a vodivost - tepelná a strukturní pnutí - deformace ev. porušení - vliv prostředí
- **2 výdrž** - prohřátí - průběh reakci (difúzní, rozpouštění, homogenizace chemického složení ap.)
- **3 ochlazování** - dle potřeby, zajištění rovnovážnosti nebo nerovnovážnosti struktury - tepelná a strukturní pnutí

1. OHŘEV na požadovanou teplotu

- Je to základní úkon při TZ, následuje výdrž.
- Rozdíly teplot povrchu a jádra vedou k vnitřním pnutím a tím i deformacím, popř. i vzniku trhlin. Trhliny mají černý okysličený povrch a dají se tím odlišit od trhlin vzniklých při jiných operacích.
- K ohřevu slouží většinou pece nebo lázně
- Při dlouhém ohřevu povrch může oxidovat nebo se oduhličit a po TZ se nedosáhne požadované tvrdosti a kvality povrchu.

1. Ohřev - příklady pecí k ohřevu

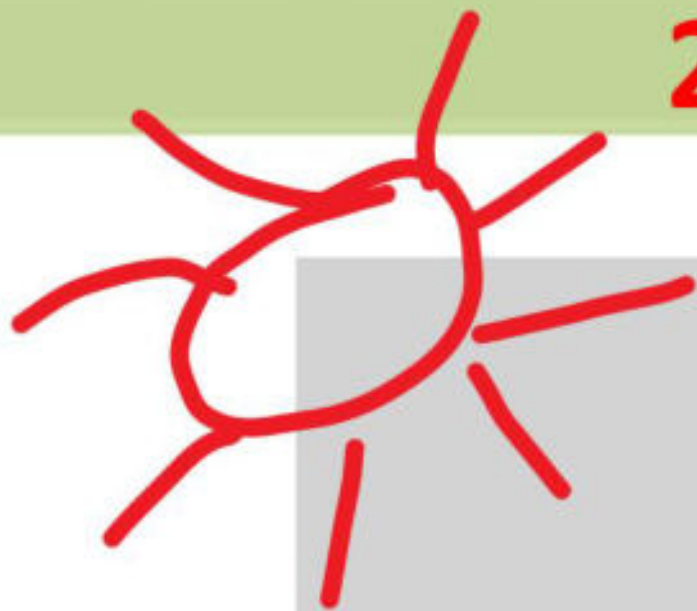


Komorová pec

Průběžná pec



2. Výdrž



SIMPLE HUMAN ICONS

Zpracování ocelí a litin

- Tepelné zpracování (TZ)
 - žíhání, kalení, popuštění
- Povrchové kalení
- Tepelně mechanické zpracování (TMZ)
- Chemicko-tepelné zpracování (CHTZ)
 - cementace, nitridace

Rozdělení TZ (bez změny chemického složení oceli)

TZ rovnovážné

ŽÍHÁNÍ

ohřev
výdrž
pomalé chlazení

S překrytalizací
Bez překrytalizace

dosažení
rovnovážného
strukturního stavu

TZ nerovnovážné

KALENÍ

ohřev
výdrž
rychlé chlazení

Martenzitické
Bainitické

zvýšení tvrdosti,
pevnosti, odolnosti
proti opotřebení

Kalitelné nad 0,2 %C,
dobře kalitelné nad 0,35
%C

POPOUŠTĚNÍ

ohřev zakalené
oceli **na teplotu
nižší než A1**,
výdrž na teplotě
(cca 2 hod.)
ochlazení vhodnou
rychlostí.

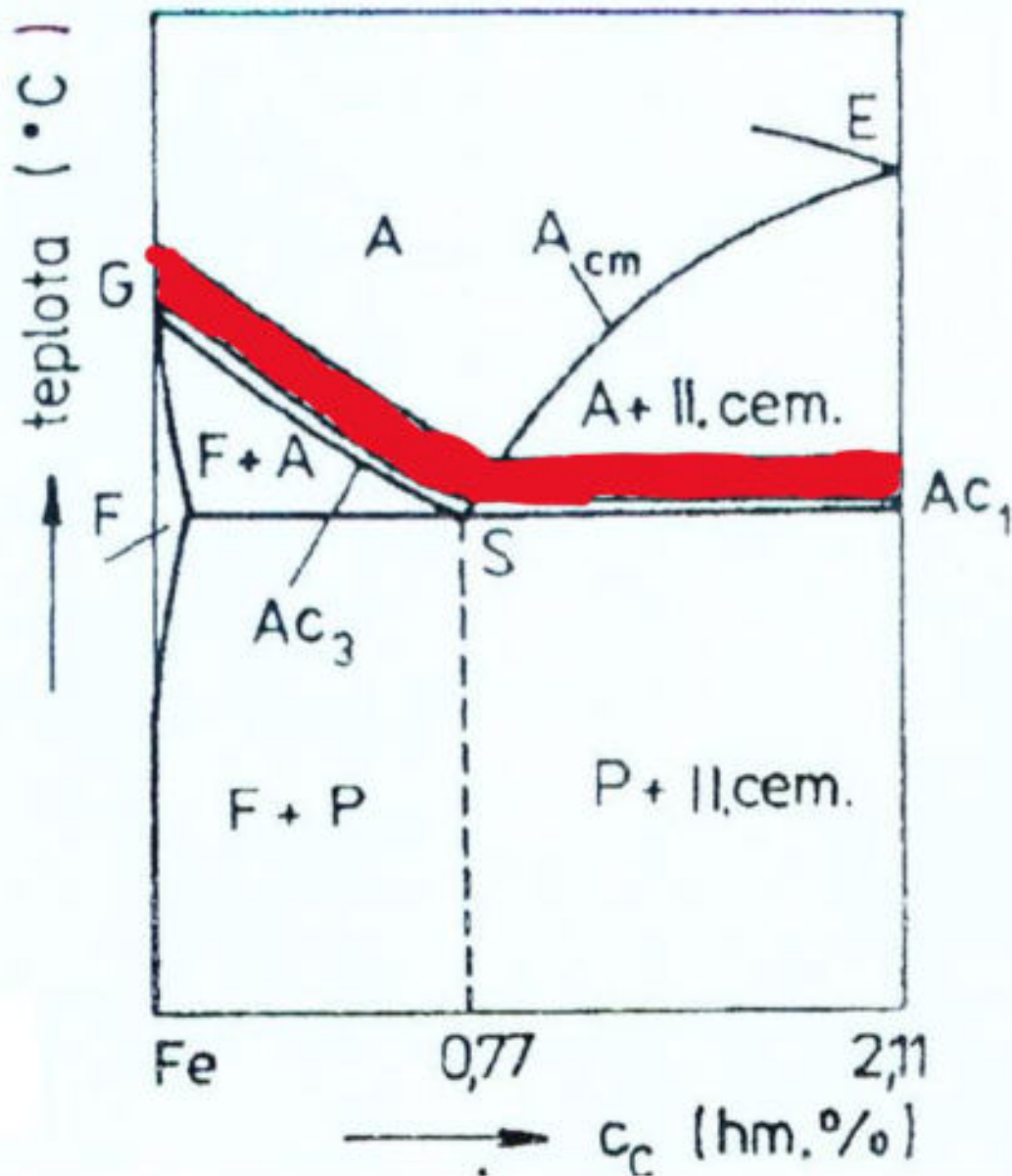
zamezení nebezpečí
popraskání zakalené
součásti

Popouštění je nutné
ihned po zakalení

Kalení

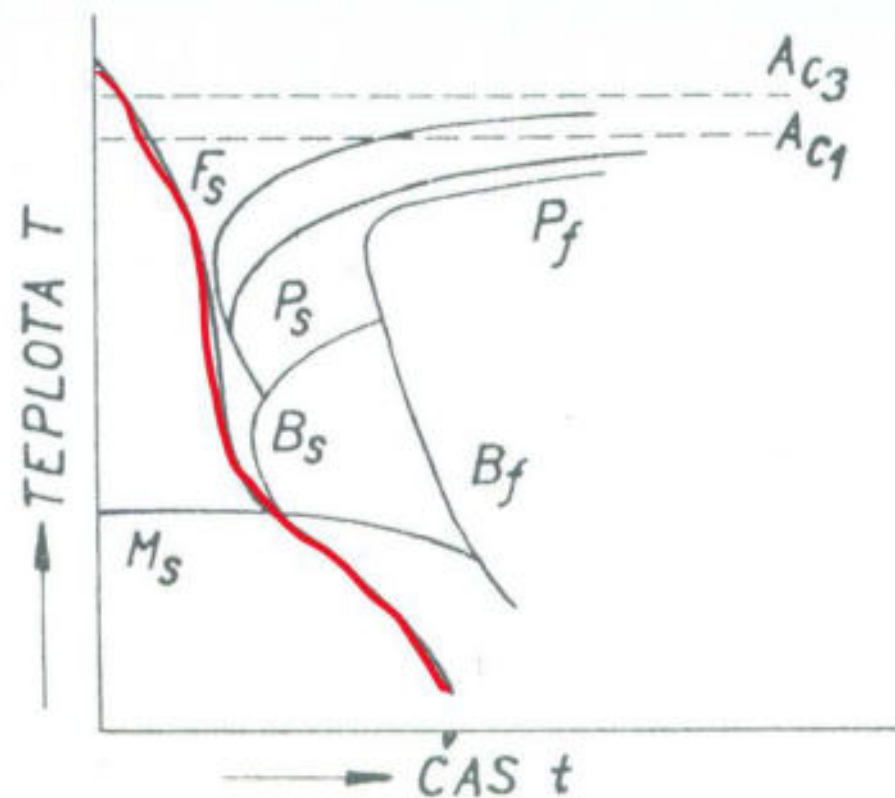
- **Kalitelnost** – schopnost oceli dosáhnout martenzitickou strukturu = zakalit se
- **Zakalitelnost** – schopnost oceli dosáhnout zakalením příslušné tvrdosti dané tvrdostí martenzitu
- **Prokalitelnost** – schopnost oceli získat tvrdost danou zakalitelností do určité hloubky pod povrchem

Kalici teplota



Ochlazování

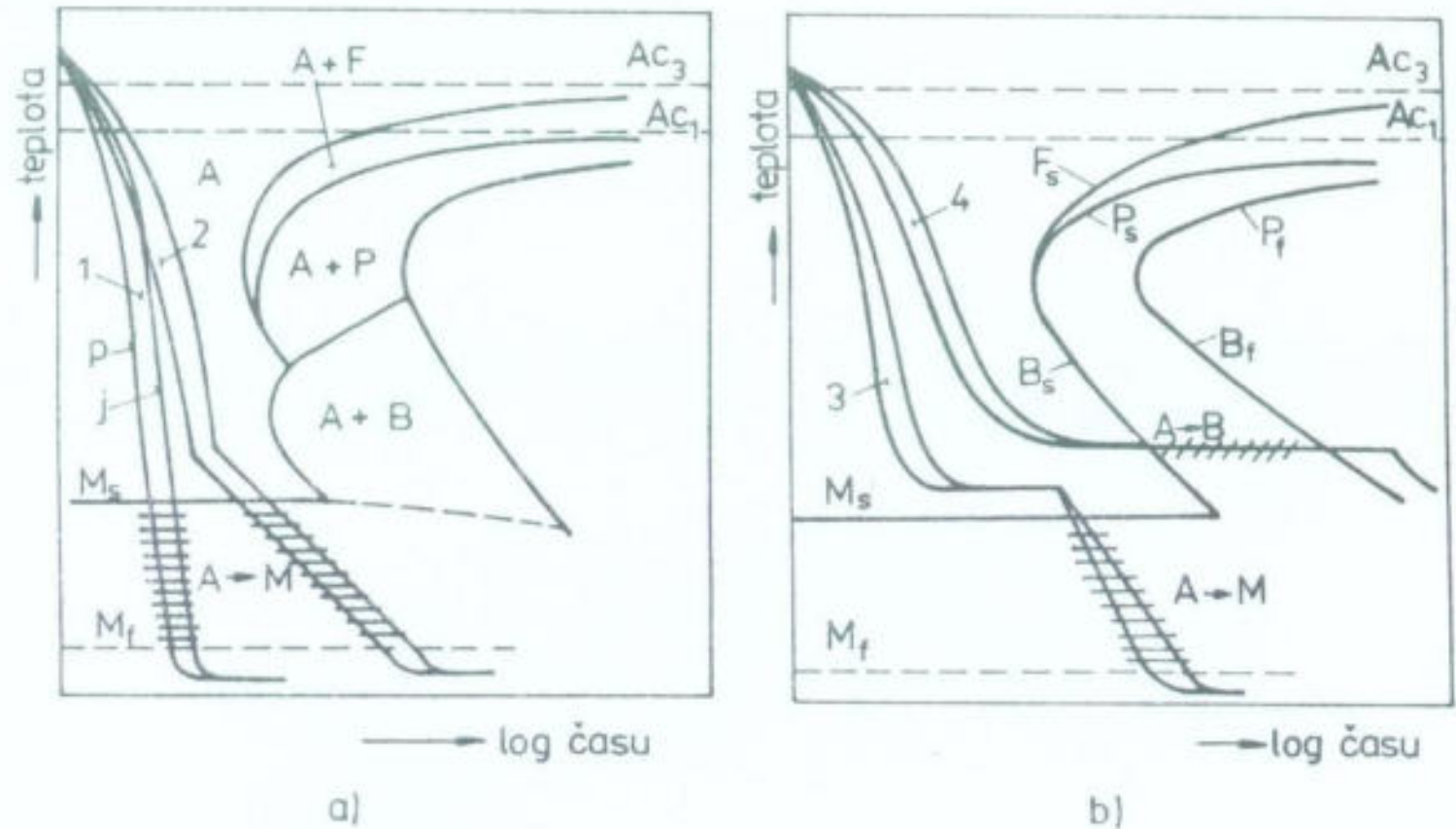
Ochlazovací rychlost na počátku menší, pak vysoká a po přechodu M_s opět nižší.



Průběh ideální křivky ochlazování při kalení

Druhy kalení

- 1- základní
- 2 – lomené
- 3 – termální
- 4 – izotermické (na bainit)

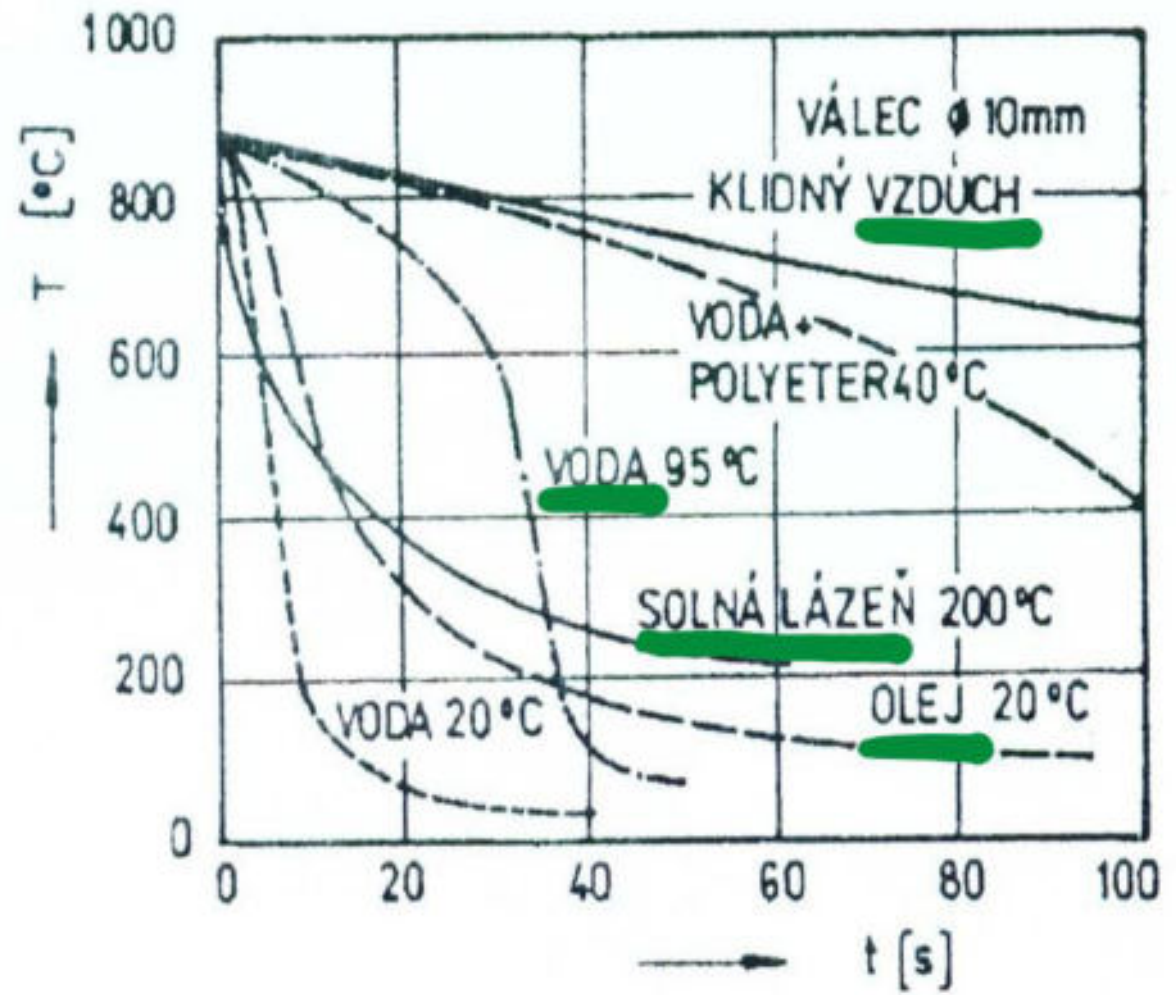


Způsoby kalení

a) do studené lázně 1, lomené 2. b) termální 3, izotermické zušlechťování 4; křivka ochlazování povrchu součásti – p, jádra součásti – j

Kalici prostředí

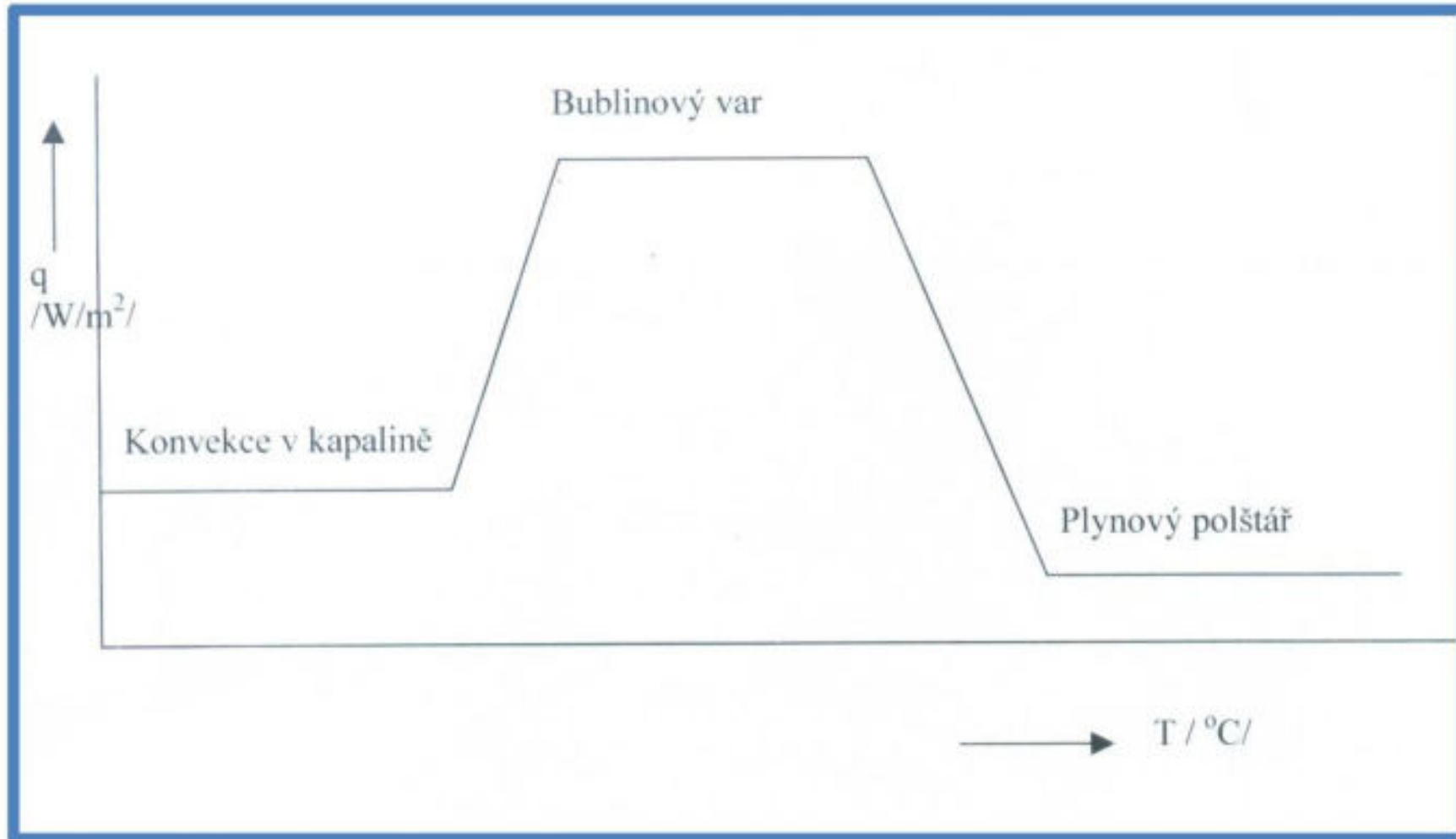
- Ochlazovací účinnost různých prostředí závisí na:
 - ✓ tepelné vodivosti
 - ✓ měrném teple
 - ✓ výparném teple
 - ✓ viskozitě kaliciho prostředí



Kalici prostředí - voda

- voda** – nejintenzivnější kalici prostředí,
parní polštář na povrchu kalené součásti – zpomaluje
odvod tepla - součástí ve vodní lázni nutno pohybovat
přísada prvků - omezují „polštář“ (kyseliny, soli, hydroxidy)
nevýhoda vody - vznik velkých pnutí
- olej** – 10× pomalejší chlazení než voda,
minerální oleje teplota 50 °C
olej stárne – nutno filtrovat či měnit
- roztavené solné lázně** – plynulé ochlazování
nejmenší vnitřní pnutí
- vzduch** – pouze samokalitelné oceli tř. 19
pro zvýšení účinku se tlakový vzduch
- roztavené kovové lázně** – výjimečně

Kalici prostředí - voda



- Parní polštář výrazně zpomaluje odvod tepla
- Po dosažení bublinového varu je odvod nejintenzivnější
- Ve třetím období se teplo odvádí jen vedením v kapalině

Ochlazovací prostředí



Kalicí vana



Průběžné chlazení

Popouštění

Vždy nutno po kalení!

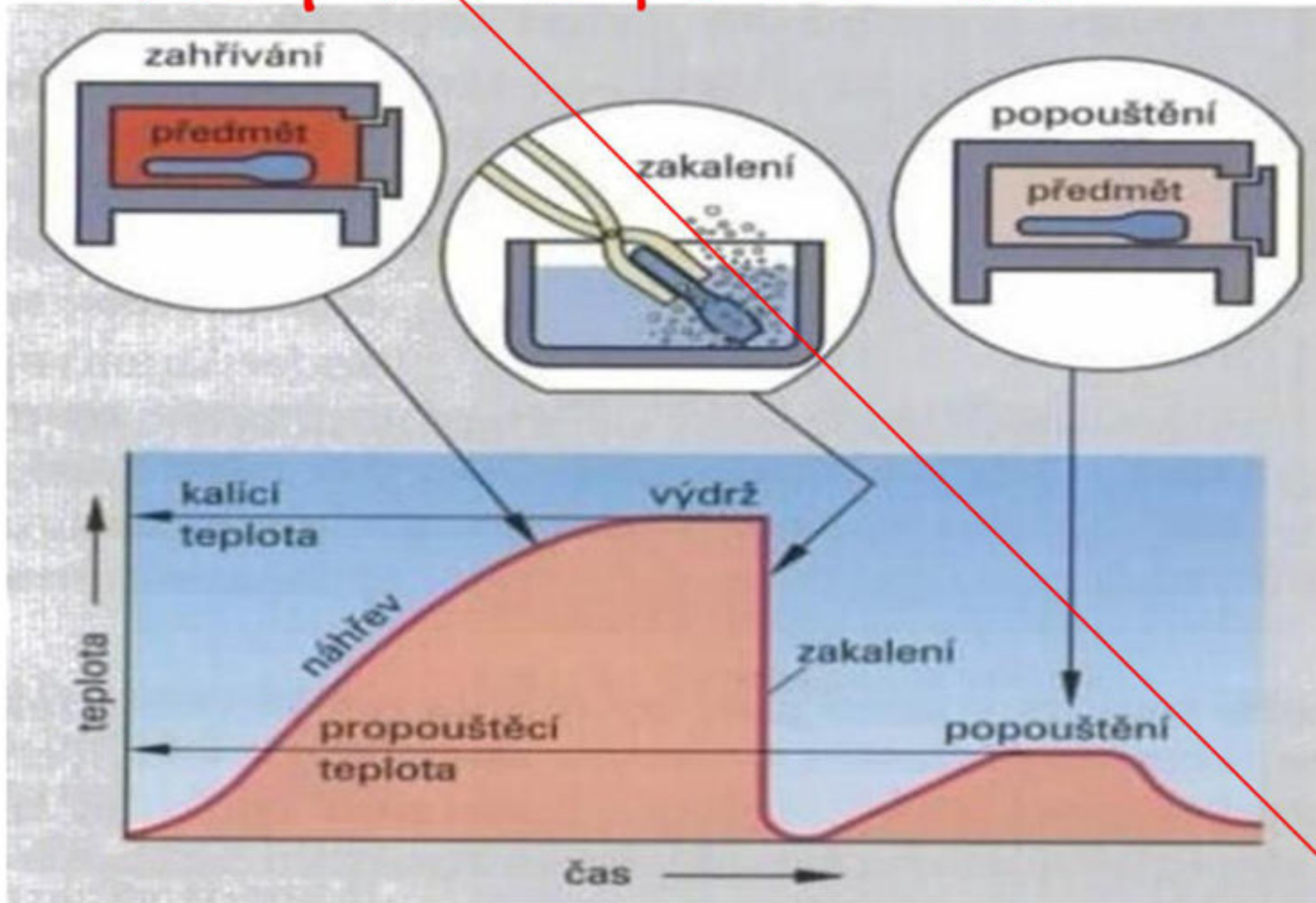
- Popuštěním rozumíme ohřev zakalené oceli na **teplotu nižší než A_1** , výdrž na teplotě (cca 2 hod.) a ochlazení vhodnou rychlostí.
- **!!!! Popouštění** by mělo následovat **ihned po zakalení** (k zamezení nebezpečí popraskání zakalené součásti)

uvolňuje uhlík ve formě přechodových karbidů a dále pak vzniká feriticko karbidická směs zvaná **SORBIT** - je houževnatější, ale méně tvrdý než martenzit.

Precipitace speciálních karbidů u legovaných ocelí vede ke zvýšení tvrdosti při popouštěcí teplotě kolem 600°C –
sekundární tvrdost

Popouštění

Vždy nutno po kalení!!!



Popouštění - dělení

Podle výšky popouštěcí teploty, která má rozhodující vliv na rozsah strukturních změn a změn mechanických vlastností, rozeznáváme:

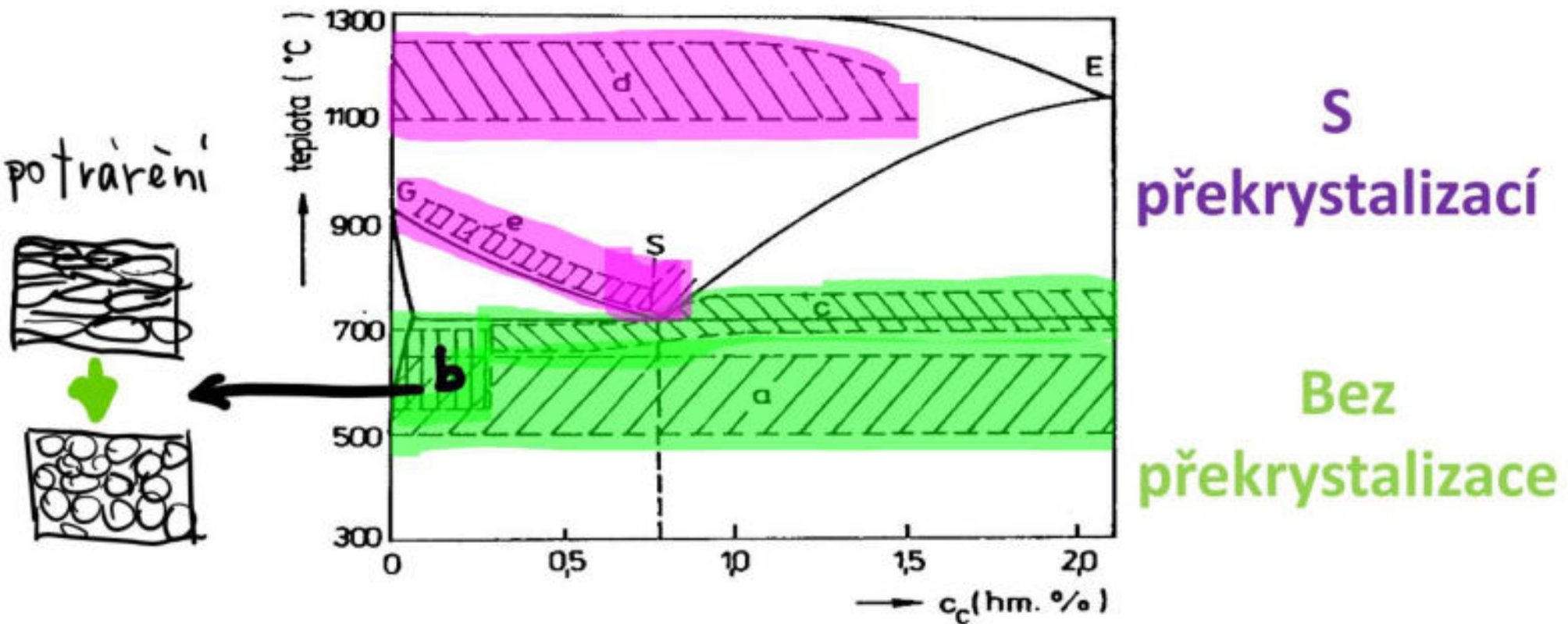
- **Popouštění na nízké teploty** (do cca 300°C) – u nástrojových ocelí, cíl: snížit vnitřní pnutí, podíl ZA a stabilizovat rozměry při zachování vysoké tvrdosti.
- **Popouštění na vysoké teploty (zušlechťování)** – obvykle u konstrukčních ocelí v rozmezí teplot 400 - 600°C k dosažení optimální kombinace mezí pevnosti a kluzu, houževnatosti a plasticity. **Sorbitická struktura.**

Pozor!

U některých druhů ocelí (s přísadou Cr, Mn, Cr-Ni) se může za určitých podmínek popouštění (delší doby výdrže, pomalé ochlazování) vyskytnout **POPOUŠTĚCÍ KŘEHKOST**

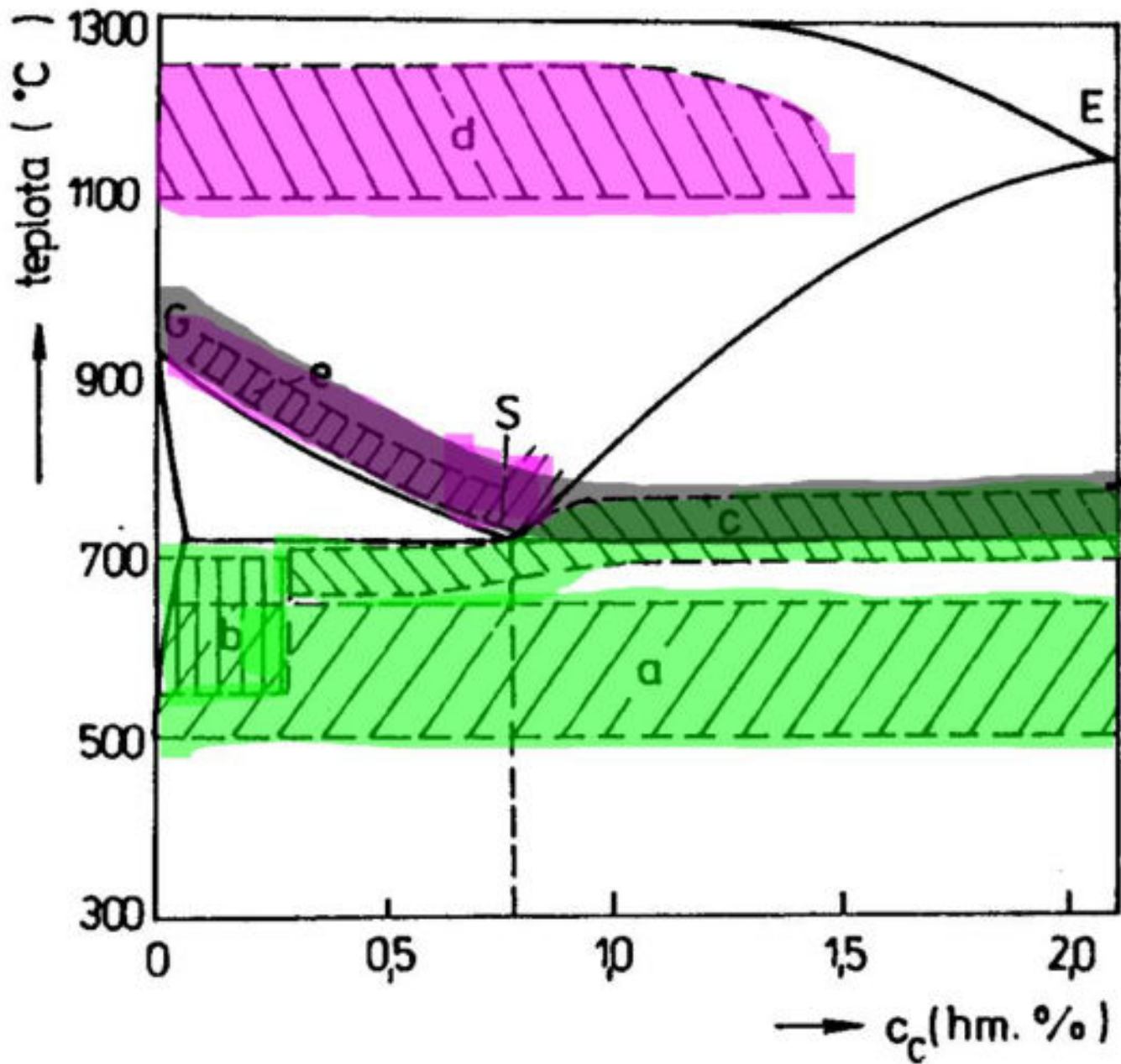
Žihání

= tepelné zpracování, směřující **k dosažení rovnovážného strukturního stavu** ➔ **malá ochlazovací rychlost** - na klidném vzduchu nebo v nevytápěné peci.



Oblasti žihacích teplot v rovnovážném diagramu

Fe-Fe₃C /žihání: a-ke snížení pnutí, b-rekrytalizační, c-na měkko, d-homogenizační, e-normalizační/



S překrytím

Kalící teploty

Bez překrytím

Oblasti žhacích teplot v rovnovážném diagramu

Fe-Fe₃C /žhání: a-ke snížení pnutí, b-rekrytizační, c-na měkko, d-homogenizační, e-normalizační/

Žíhání litin

např. ke snížení vnitřních pnutí, k odstranění perlitu ze struktury – zvýšení obrobiteľnosti, snížení tvrdosti (odstranění ledeburitického cementitu) atd.

Kalení litin

- Cílem je dosažení martenzitické nebo bainitické matrice
- Výsledná tvrdost je u litin nižší než u ocelí
- Při kalení mají litiny sklon k praskání

Povrchové kalení

- Zakalí se povrch součásti při zachování původní struktury jádra
- Vysoká povrchová tvrdost při houževnatém jádru je požadována u součástí, které mají mít vysokou odolnost proti opotřebení, proti dynamickému rázovému namáhání a vysokou mez únavy

Princip

- Rychlé ohřátí povrchové vrstvy na kalicí teplotu
- krátká výdrž
- rychlé ochlazení, kdy se A v povrchové vrstvě změní na martenzit

Způsoby povrchového kalení

- Povrchové kalení plamenem
- Indukční
- ponorné
- elektrolytické
- laserové povrchové
- elektronovým paprskem
- laserové legování povrchu

Tepelně mechanické zpracování (TMZ)

- Kombinace tváření a fázové přeměny
- Výsledkem jsou vysoké pevnostní vlastnosti
- Nejčastější jsou postupy, kdy se tváří v oblasti austenitu a po deformaci následuje martenzitická přeměna.
- Tvářením austenitu se zjemní zrna, martenzit pak bude také jemný

Využití TMZ

- pro nízko a středně legované podeutektoidní oceli, kde se dosahuje vyšších pevnostních i plastických vlastností
- u komplexně legovaných ocelí s vysokou prokalitelností

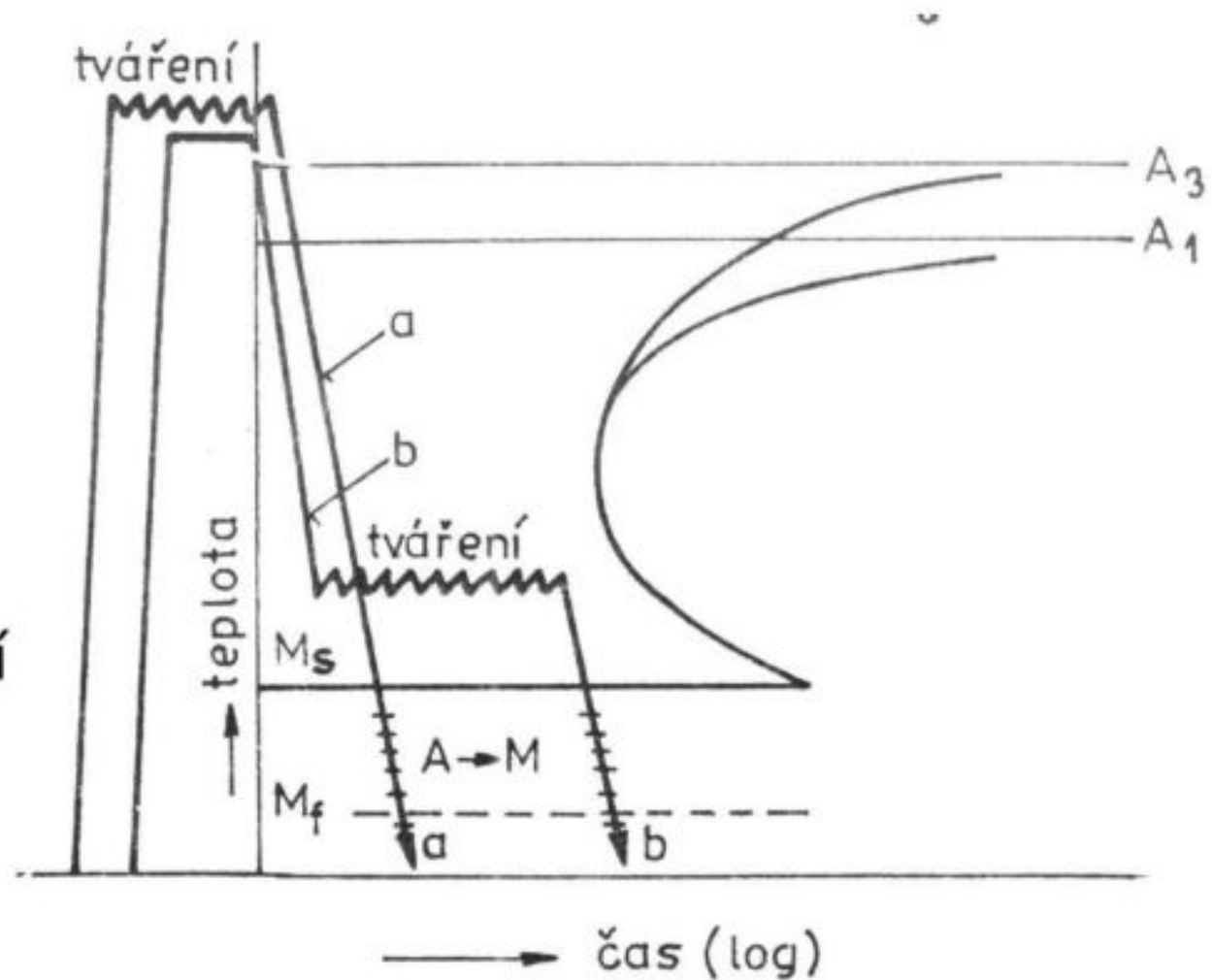
Druhy TMZ

Vysokoteplotní

(a) – tváření v oblasti nad A_3 , stupeň deformace 40 – 90%. Zakalení bezprostředně poté (dřív než proběhne rekrystalizace cca do 1 min).

Nízkoteplotní

(b) – austenitizace nad A_3 , ochlazení nad M_s (metastabilní austenit), tváření, zakalení. Deformace cca 50%



Chemicko-tepelné zpracování (CHTZ)

CEMENTOVÁNÍ – nasycení povrchu uhlíkem

NITRIDOVÁNÍ - nasycení povrchu dusíkem

- CHTZ je difúzní sycení ocelí kovy nebo nekovy za zvýšené teploty.
- **Mění se chemické složení povrchové vrstvy**, ale jádro zůstává nezměněno
- U některých pochodů následuje tepelné zpracování, u jiných nikoli.
- K základním pochodům patří **cementace, nitridace**, existuje ale řada dalších.

Cementace – již staří Římané 😊

- **Difúzní sycení povrchu uhlíkem**, aby jej pak bylo možno zakalit na vysokou tvrdost – houževnaté jádra, tvrdý povrch
- Výchozí materiál má max. 0,25 % C
- Vrstva řádově desetiny až 3 mm, rychlost růstu cca 0,1 mm/hod.
- Provádí se v prostředí **pevném, kapalném nebo plynném**

Typ cementace	médium	Teplota [°C]	% C po ukončení	Další úprava
v plynu	směs uhlovodíků metan	850 - 900	0,8 - 1	Kalení z cementační teploty či z nového ohřevu (jemnější zrno) Popouštění na 150-180°C 58-62 HRC
v prášku (jen pro kusovou výrobu)	mleté dřevěné uhlí a 7-20 % BaCO ₃ jako katalyzátor			
v lázni NEEKO 😞	chloridové a kyanidové sole			

Nitridace

- Difúzní sycení povrchu dusíkem
 - Vytvoří se vysoce disperzní tvrdé nitridy slitinových prvků
 - Vrstvy tloušťky 0,1 až 0,5 mm
 - Teplota 500 - 540°C, dlouhé doby (cca za 20 hod. vrstva 0,3 mm)
 - Vhodné pro oceli legované prvky, tvořícími tvrdé nitridy – např. Cr, Al, V, Mo
- Sycení v plynu (amoniak NH_3)
 v lázni (kyanidování – NEEKO ☹)

Plazmová (Iontová) nitridace

PVD metoda (physical vapor deposition)

Tato technologie aktuálně vytlačuje klasické nitridovací technologie, které jsou časově náročné, vyžadují vysoké teploty povrchu součástí atd. Plazmová nitridace se realizuje v silně nerovnovážných podmínkách za jakých vznikají modifikace povrchových vrstev jiným způsobem nedosažitelné.



Plazmová (Iontová) nitridace

- Dusík ve formě plasma ve vakuové komoře
- Ionty dusíku dopadají na povrch součásti s velkou energií – bombardují povrch – součást se ohřívá a většinou není nutný další ohřev.
- Ionty dusíku mají poměrně velkou pronikavost – touto metodou vznikají silnější vrstvy za kratší dobu než klasicky.

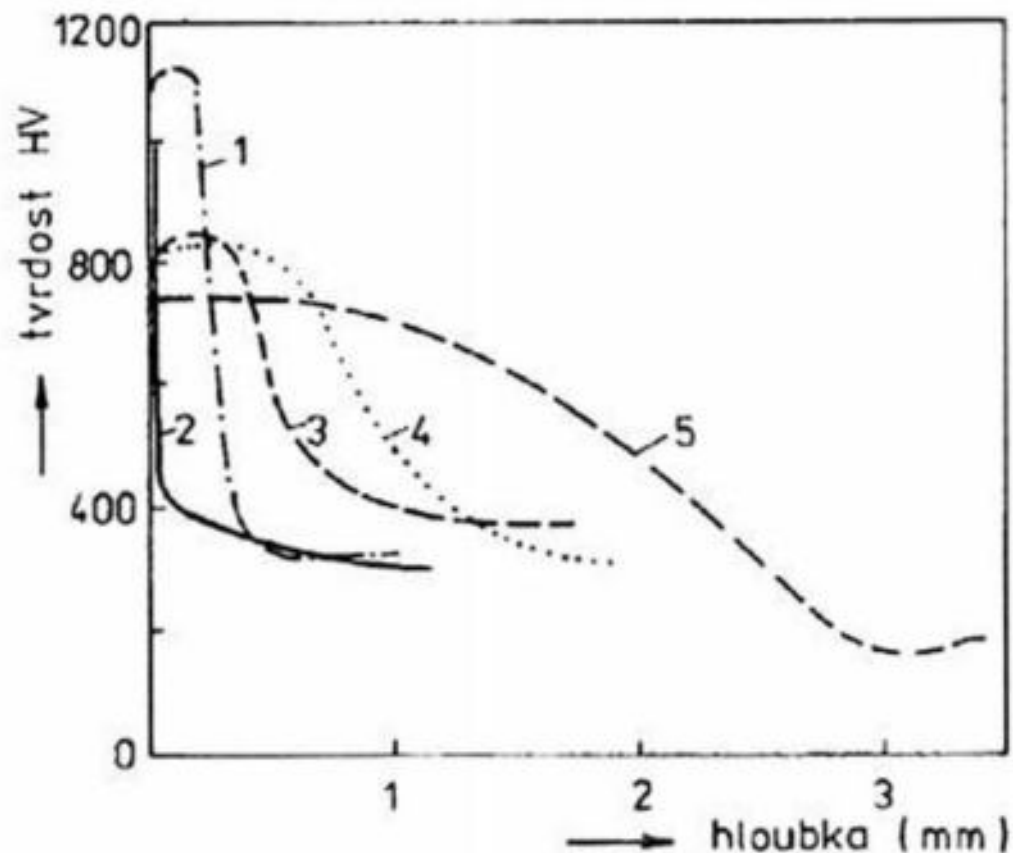
- Iontová nitridace povrchové vrstvy ocelí vede ke značnému **zvýšení tvrdosti povrchu při současném zachování dobré houževnatosti**. Takto iontově nitridované zpracované povrchy součástí vykazují vysokou otěruvzdornost, odolnost proti vzniku únavových trhlin, lepší odolnost proti korozi a teple.



Další metody

Karbonitridace – současné sycení uhlíkem a dusíkem – nekalí se

Nitrocementace – současné sycení uhlíkem a dusíkem, musí následovat tepelné zpracování



Závislost tvrdosti *HV* na vzdálenosti od povrchu

1 – po nitridaci, 2 – po karbonitridaci, 3 – po nitrocementaci,
4 – po cementaci, 5 – po povrchovém kalení

Tvorba tenkých povlaků

*Bude v přednášce
12 Nanomateriály*

Děkuji vám za pozornost