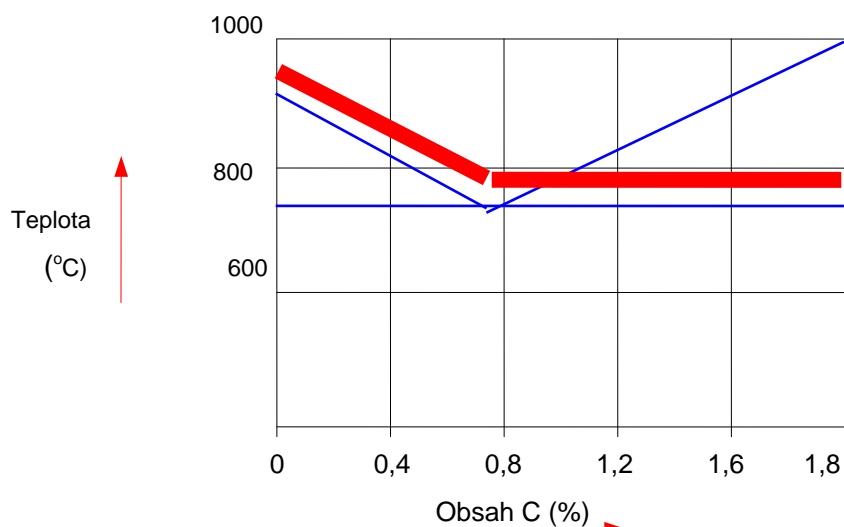


## KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ

Účelem kalení je zvýšit tvrdost oceli. Je to ohřev součásti na teplotu nad  $A_{C3}$  popř.  $A_{C1}$ , výdrž na této teplotě a ochlazování kritickou rychlostí, čímž se potlačí vznik feritu a perlitu a zachovaný nestabilní austenit při teplotách pod 500 °C se přemění na bainit nebo martenzit. Z toho plyne, že kalicí teplota musí ležet nad překrystalizačními teplotami oceli, aby struktura před kalením byla u podeutektoidních ocelí homogenním austenitem a u ocelí nadeutektoidních směsí austenitu a cementitu. Správné kalicí teploty se volí 30 až 50 °C nad  $A_{C3}$  u ocelí podeutektoidních nebo nad  $A_{C1}$  u nadeutektoidních. U ocelí nadeutektoidních nevolíme teploty kalení nad  $A_{Cm}$  z toho důvodu, že zbylý cementit po ohřevu jen nad  $A_{C1}$  je tvrdou složkou, a tedy přispívá k tvrdosti oceli po kalení. Naopak kalení z teplot nad  $A_{Cm}$ , stoupne množství zbytkového austenitu, což vede ke vzniku struktur o menší tvrdosti.



Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe - Fe<sub>3</sub>C

Protože pro kalení je charakteristickým rysem vznik martenzitu nebo bainitu, musí být rychlost ochlazování větší než kritická rychlost ochlazování.

### Kalitelnost

**Je to schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšení tvrdosti.** Přitom nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli po kalení je **závislá** především na obsahu **uhlíku**. Při nízkém obsahu uhlíku se nedosáhne vysoké tvrdosti. Proto považujeme teprve uhlíkové oceli obsahující více než 0.35% uhlíku za dobře kalitelné a méně než 0.2% C za nekalitelné. U slitinových ocelí je hranice obsahu uhlíku posunuta k nižším hodnotám. Tvrdost martenzitu již mnoho nestoupá, zvyšuje-li se obsah uhlíku nad eutektoidní obsah. Nejvyšší tvrdost martenzitu bývá HV=950 nebo HRC=66. Ostatní prvky mají na tvrdost po kalení jen nepatrný vliv.

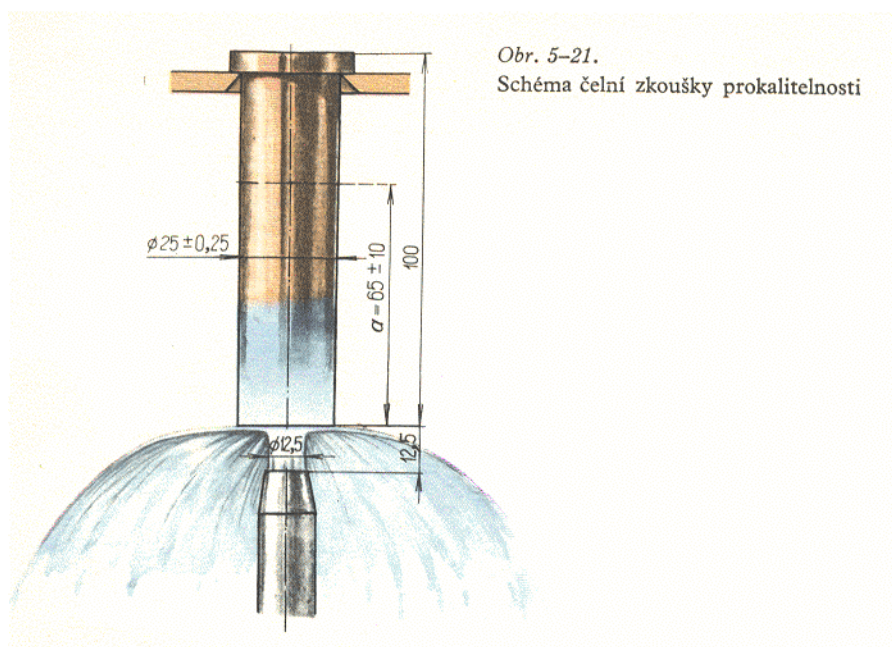
### Prokalitelnost

**Je schopnost dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem tvrdosti odpovídající kalitelnosti dané oceli při 50% martenzitu ve struktuře.** Prokalitelnost bude v první řadě závislá na tvaru diagramu ARA, čímž bude inkubační doba delší tj. křivky Ps a Bs více vpravo, tím větší hloubky zakalené vrstvy dosáhneme při stejné rychlosti ochlazování. Je to proto, že rychlost ochlazování předmětu na jeho povrchu je dána kalícím prostředím, a to podle toho, jak rychle je schopno odnímat teplo z povrchu oceli. Naproti tomu rychlosti ochlazování uvnitř průřezu v určitých vzdálenostech od povrchu jsou dány tepelnou vodivostí ocelí a samozřejmě teplotním rozdílem mezi daným místem a povrchem.

Na tvar diagramu ARA mají velký vliv přísadové prvky a budou proto určovat prokalitelnost ocelí. Veškeré prvky, s výjimkou kobaltu, které se rozpouštějí v austenitu, zpomalují rozpad austenitu, prodlužují inkubační doby a posunují rozpadové křivky doprava k delším časům. Snižují tedy kritickou rychlost ochlazování.

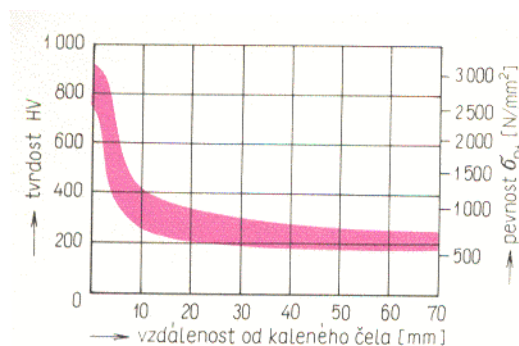
Na prokalitelnost má ještě značný vliv velikost austenitického zrna. Čím bude zrno jemnější, tím bude vyšší kritická rychlost a naopak. Avšak druhého způsobu zvyšování prokalitelnosti nadměrným zvětšením zrna vede k výraznému zhoršení mechanických vlastností, zejména vrubové houževnatosti.

Protože jednotlivé tavby oceli stejné značky se od sebe poněkud liší chemickým složením, bylo by nutné zjišťovat křivku ARA pro každou tavbu a kontrolovat, zda odpovídá normou předepsané prokalitelnosti. Stanovení křivek ARA je zdlouhavé a proto byla vypracována a normalizována **čelní zkouška prokalitelnosti** (ČSN 42 0447).



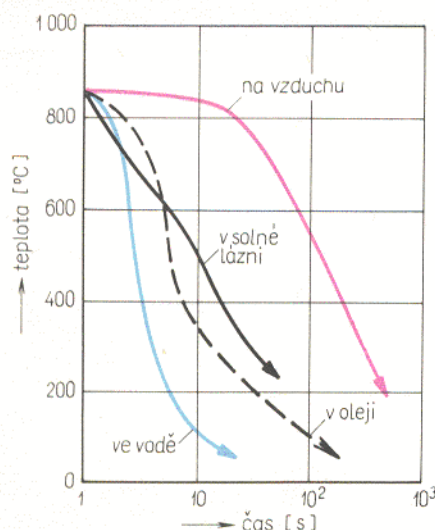
Při této zkoušce se čelo standardního válcového zkušební vzorku, který se v peci ohřeje na kalící teplotu, ochlazuje ve zvláštním přípravku proudem vody. Rychlost ochlazování je největší na kaleném čele a se vzrůstající vzdáleností od čela se plynule zmenšuje. Po zakalení se na vzorku vybrousí podélně ploška v hloubce 0,4 mm, na níž se zjišťuje tvrdost podle Vickerse v postupně se zvětšujících vzdálenostech od kaleného čela.

Zjištěné hodnoty tvrdosti v jednotlivých bodech vyneseme do diagramu a jejich spojením dostaneme tzv. **křivku prokalitelnosti**. Vzhledem k povolenému rozmezí chemického složení u dané oceli podle materiálového listu (např. obsah C může kolísat v rozmezí 0,1%) bude určitá ocel prokalitelná v určitém rozmezí, v tzv. **pásu prokalitelnosti**. U ocelí se zaručenou prokalitelností musí křivka prokalitelnosti každé tavby ležet uvnitř pásu prokalitelnosti dané oceli.



### Kalící prostředí

Pro oceli s malou prokalitelností, tj. s krátkou inkubační dobou podle diagramu ARA, musíme volit kalící prostředí intenzivněji působící, tj. prostředí dávající vyšší ochlazovací rychlosti. U ocelí s větší prokalitelností postačí kalící prostředí působící méně intenzivně (olej nebo vzduch). Při velké rychlosti ochlazování vzniká totiž velký teplotní rozdíl mezi povrchem a jádrem součásti, který vede ke vzniku tepelných pnutí, která se přičítají k pnutím způsobeným vlastní martenzitickou přeměnou. Tím mohou výsledná pnutí nabýt hodnot, které způsobí trvalou deformaci součásti nebo dokonce její prasknutí.



Obr. Průběh ochlazování ve středu vzorku  $\varnothing 10$  mm, kalených z teploty 850 °C do různých prostředí

Voda-nejstarší kalící prostředí. Ochlazení však neprobíhá plynule. Po ponoření součásti ohřáté na teplotu kalení se kolem ní vytvoří parní polštář, který zpomaluje ochlazování. V tomto stádiu není rychlost ochlazování největší. Po ochlazení na teplotu asi 400 °C se parní polštář poruší a nastává intenzivní ochlazování prudkým varem vody. Ve třetím stadiu intenzita ochlazování opět klesá. Nejvyšší účinnost má vodní sprcha.

Olej-mnohem mírnější prostředí, i když ochlazování v nich proniká podobně jako u vody, jen s tím rozdílem, že parní film se dříve poruší a maximum ochlazovacích rychlostí leží 500 °C. V oblasti martenzitické přeměny bývá rychlost ochlazování u olejů asi 10krát menší než u vody. Ke kalení se používá převážně **minerálních olejů**. Proto musí být olejové kalící lázně ohřáté, zpravidla na 50 °C.

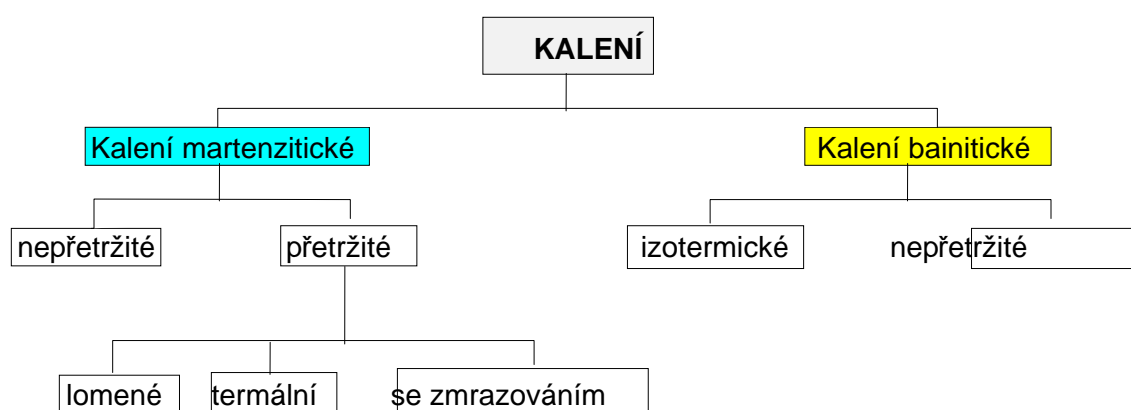
Roztavené solné lázně-vyznačují se plynulým ochlazováním. To znamená, že jejich rychlost ochlazování bude v prvním stadiu vyšší a bude postupně klesat s klesajícím teplotním rozdílem mezi předmětem a lázní. Z počátku intenzivní ochlazování později v oblasti martenzitické přeměny pomalejší.

Roztavené kovové lázně-používáme jen v některých případech

-podobné vlastnosti jako solné

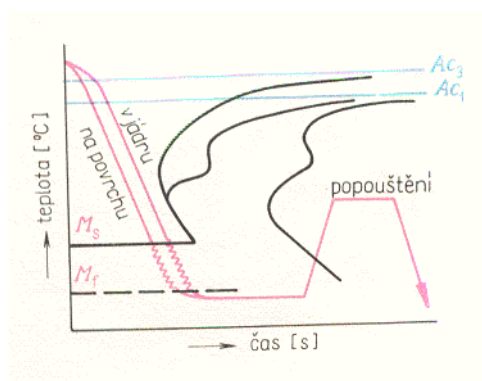
Vzduchem-kalí se hluboko prokalitelné oceli, např. rychlořezné oceli. Vnitřní pnutí je velmi malé. Kalení na vzduchu je však spojena s nebezpečím oduhlíčení. Proto kalíme hlavně rozměrné předměty.

## Způsoby kalení

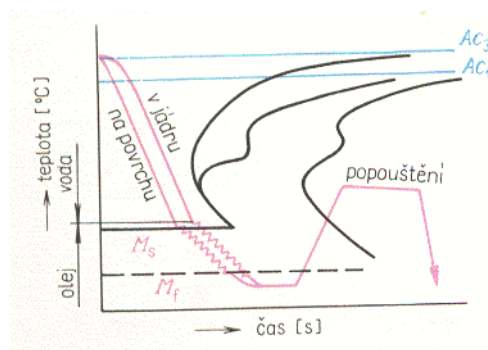


## Způsoby kalení martenzitického

**Nepřetržité kalení** - běžný postup a záleží v ohřevu předmětu na teplotu vyšší než  $A_{C3}$ , popř.  $A_{C1}$ , ve výdrži na této teplotě k dosažení homogenního austenitu a v ochlazení v kalícím prostředí (voda, olej, vzduch), jehož teplota je nižší než teplota počátku martenzitické přeměny.



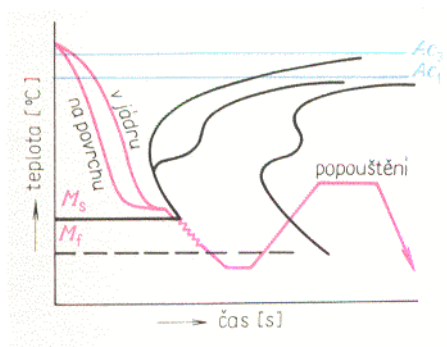
**Přerušované (lomené) kalení** - probíhá tak, že se ochlazuje ve dvou studených lázních po sobě. Předmět se vyjme z první lázně po takové době, aby jeho teplota byla o něco vyšší než teplota  $M_s$  dané oceli, a dochladí se v druhé lázni s menším ochlazovacím účinkem právě v oblasti martenzitické přeměny. Nevýhodou je nutnost stanovení správného okamžiku pro přemístění z vody do oleje. Tím se zmenší vnitřní pnutí proti vnitřnímu pnutí při prostém kalení do vody. **Používá** se u složitějších předmětů z ocelí kalitelných do vody.



**Částečné kalení**- používá se někdy v nástrojárnách, zejména při kalení jednobřitových nástrojů. Nástroj se ponoří do vodní lázně nebo olejové lázně pouze tou částí, která má mít vysokou tvrdost. Jiný způsob je ten, že na austenitickou teplotu se ohřeje pouze ta část předmětu, která má být zakalena. Po zakalení se břit popouští vlastním teplem ostatní části nástroje.

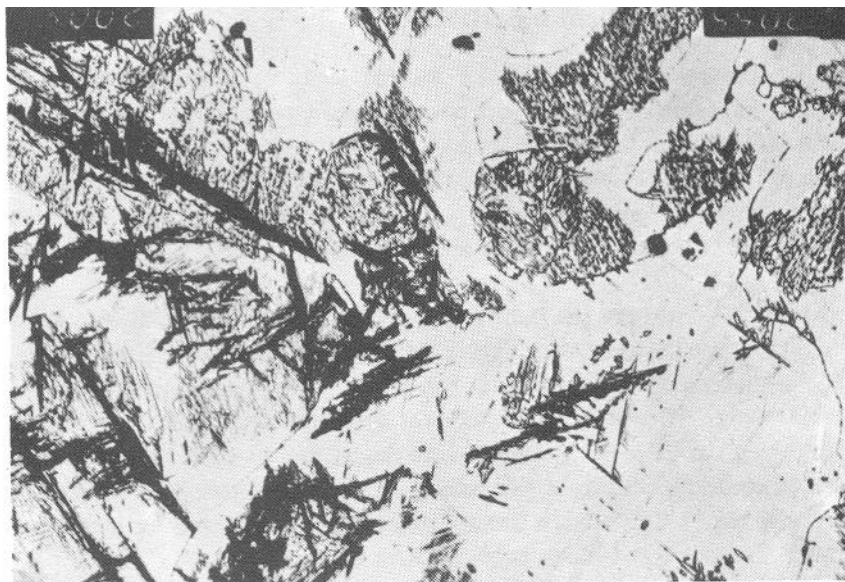
**Termální kalení** - snižuje pnutí a deformace v kaleném předmětu. Předmět ohřátý na austenitizační teplotu se ochladí v solné lázni o teplotě těsně nad teplotou počátku martenzitické přeměny dané oceli (asi 20 až 30 C nad  $M_s$ ). Na této teplotě může předmět setrvat poměrně dlouhou dobu, aniž by došlo k bainitickému rozpadu. Tím je možno dosáhnout vyrovnaní teplot v jádře a na povrchu předmětu při zachování austenitického stavu. Po vyrovnaní těchto teplot se vyjme předmět ještě v austenitickém stavu z lázně a ochlazuje se dále volně na vzduchu. Martenzitická přeměna pak probíhá při pomalé ochlazovací rychlosti, a proto je vnitřní pnutí podstatně menší než při kalení do studené lázně.

Termální kalení je vhodné pro kalení menších součástí tvarově složitých a nástrojů z uhlíkových a nízkolegovaných ocelí, určených pro kalení do vody.



**Kalení se zmrazováním** - následuje po kalení martenzitickém další ochlazování oceli, jejíž teplota  $M_f$  leží pod  $0^\circ\text{C}$ , na teploty pod bodem mrazu, aby se dosáhlo co největšího rozpadu zbytkového austenitu na martenzit. Používá se hlavně u nadeutektoidních ocelí. Musí být provedeno ihned po zakalení, aby se nestabilizoval zbytkový austenit. Používá se hlavně tam, kde se požaduje stabilizace rozměrů součástí, např. měřidel, valivých ložisek ap.





Struktura primárního martenzitu, sekundárního martenzitu vzniklého rozpadem zbytkového austenitu po zmrazení a zbytkového austenitu.

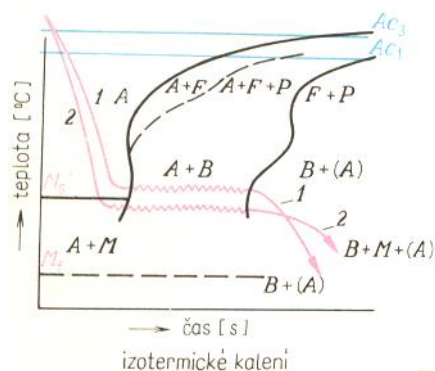
## Způsoby kalení bainitického

**Izotermické bainitické kalení** - bylo vyvinuto na základě znalosti diagramů IRA. Abychom dosáhli izotermického pochodu, musíme použít pro ochlazení buď solných, nebo kovových lázní. Po skončení izotermické přeměny předmět z lázně vyjmeme a ochladíme (obvykle na vzduchu).

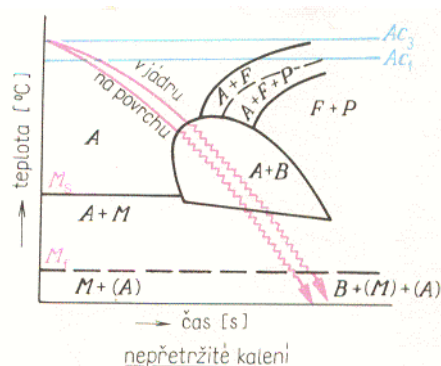
Tento postup se hodí pro středně prokalitelné oceli, t.j. oceli nízko a středně legované, pro součásti středního a menšího průřezu.

Izotermický rozpad austenitu při tomto kalení může probíhat dvojím způsobem:

- a) V oblasti teplot přeměny austenitu na bainit. Zakalená ocel se již nepopouští! Tento postup se nazývá **izotermické zušlechťování**. Protože nevzniká martenzit, jsou pnutí menší a deformace součásti téměř nulové. Přitom lze dosáhnout pevnosti 1000 - 2000 MPa při velmi dobré houževnatosti.
- b) V oblasti teploty těsně pod  $M_s$ . V tomto případě se zakalená ocel vzhledem k přítomnosti určitého podílu martenzitu vedle bainitu obvykle popouští.



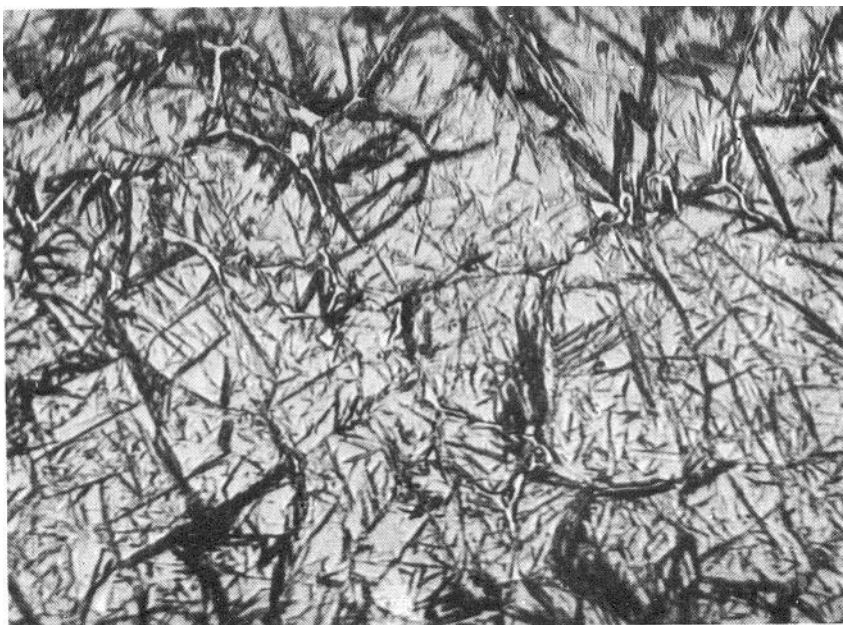
**Nepřetržité bainitické kalení** záleží v dostatečně rychlém plynulém ochlazování po austenitizaci na kalící teplotu, aby se zajistil rozpad austenitu na bainit nebo směs bainitu a martenzitu. Obvykle následuje popouštění. Toto kalení je možné pouze u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v diagramu ARA.



## POPOUŠTĚNÍ KALENÉ OCELI A JEHO KOMBINACE S KALENÍM

Ocel zakalená na martenzitickou strukturu má značné vnitřní pnutí a je kromě toho, že má velkou tvrdost, také značně křehká. Aby se snížilo vnitřní pnutí a tím i křehkost (popř. k získání houževnaté struktury), je vhodné ocel po kalení popouštět. Je to ohřev na určitou (popouštěcí) teplotu pod  $A_{c1}$ .

Martenzit (přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ ) vzniklý po základním kalení má jehlicovitý tvar a říkáme mu **martenzit tetragonální**. Při popouštění na teploty 80 až 180 °C podle druhu oceli dojde uvnitř jehlic k vyloučení (precipitaci) uhlíku v podobě přechodných fází (karbidů). Toto stadium martenzitu nazýváme kubickým martenzitem. Vyznačuje se mírným, někdy velmi nepatrným poklesem tvrdosti, ale výraznějším poklesem křehkosti. V rozmezí teplot 180 - 300 °C se rozpadá zbytkový austenit na bainit. Současně v teplotním rozmezí 200- 400°C dochází k úplnému rozpadu martenzitu na ferit a cementit ve velmi jemné formě. Přitom vyloučený cementit má tvar kuliček a zůstává ještě částečně zachována jehlicovitá struktura. Za teplot nad 400°C až do  $A_1$  se postupně cementitové kulovité částice zvětšují a mizí jehlicovitý charakter struktury. Výsledkem je jemná struktura s kuličkovitým cementitem v základní feritické hmotě a označujeme ji názvem **sorbit**. Tato struktura se vyznačuje pevností a vysokou houževnatostí.

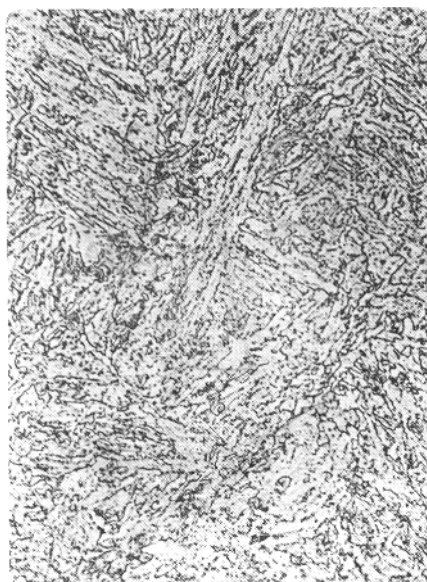


Struktura sorbitu

Z hlediska výše popouštěcích teplot dělíme popouštění do dvou skupin:

**a) popouštění za nízkých teplot asi do 350 °C**, které často v praxi nazýváme napouštěním. Protože je používáme převážně u nástrojových ocelí, můžeme také mluvit o popouštění nástrojů, což pro praktické účely je vhodnější rozlišení.

**b) popouštění za vysokých teplot na 350 až 700 °C.** Tomuto popouštění ve spojení s kalením říkáme podle ČSN 42 0004 **zušlechťování**.

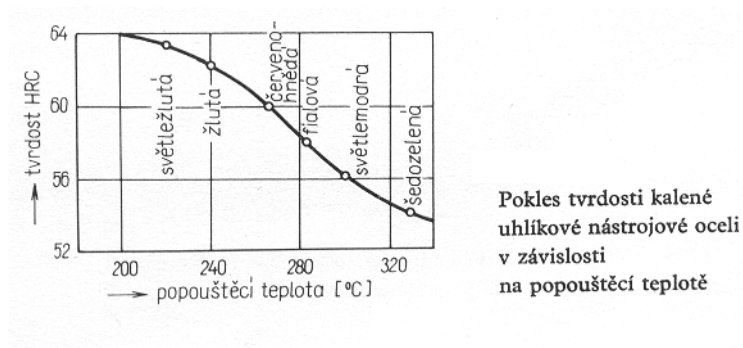


Struktura sorbitu

### Popouštění nástrojových ocelí

Je to zpravidla ohřev pod 350 °C. Výjimku tvoří ty případy kdy vyžadujeme vysokou houževnatost. Potom mohou popouštěcí teploty dosáhnout hodnot až 400 °C i o něco více. Další výjimkou jsou rychlořezné a vysokolegované oceli pro práci za tepla (např. zápustky).



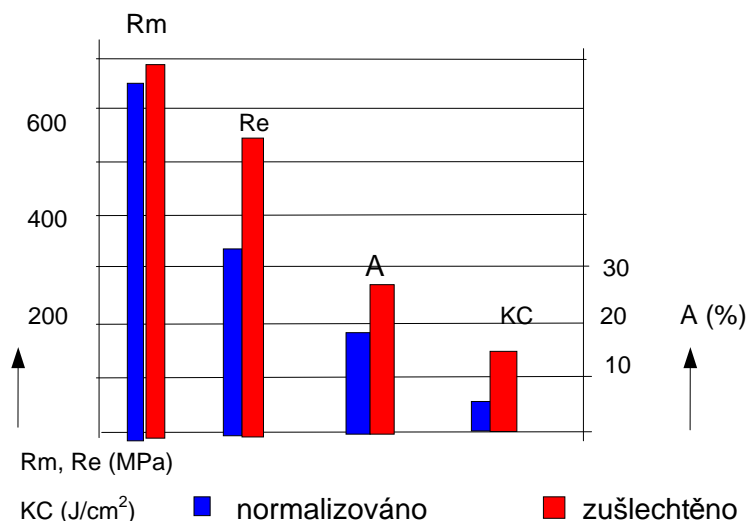


Účelem popouštění je zmírnění křehkosti a citlivosti nástrojů na nárazy při práci, aniž by se snížila jejich tvrdost. Podle postupu při popouštění nástrojů dělíme popouštění na **celkové** a **místní**. Při místním popouštění se popouští jen určitá část nástroje.

Při celkovém popouštění se prohřívá celý nástroj. Nástroje, u nichž se požaduje největší tvrdost, se napouštějí při teplotách 100 až 180 °C. Jde pak o tzv. **vyvařování v oleji**.

### Zušlechťování

Účelem je dosáhnout vysoké meze kluzu, pevnosti a odolnosti proti únavě materiálu při vysoké houževnatosti. Stav po tomto tepelném zpracování označujeme doplňkovou číslicí 6, 7, 8 za značkou oceli. Při zušlechťování je jednou ze základních podmínek prokalení předmětu v celém průřezu.



Význam zušlechťování vyplývá z uvedeného diagramu, kdy výrazně se zvýší mez kluzu a hlavně vrubová houževnatost u zušlechtěné oceli. Čím vyšší mez kluzu, tím lze součást zatížit více bez nebezpečí deformace a čím vyšší vrubová houževnatost, tím větší odolnost oceli proti křehkému porušení nenadálými rázy.

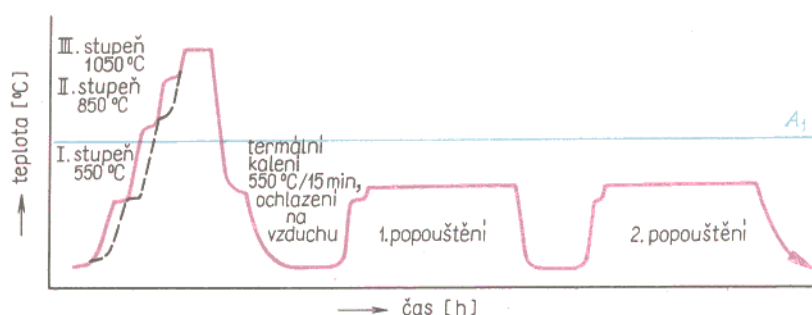
Z uvedeného rozsahu popouštěcích teplot při zušlechťování jsou vyhrazeny teploty v rozmezí mezi 400 - 550°C podle druhu oceli pro zušlechťování pružin, kdy se požaduje hlavně vysoká mez pružnosti.

Při zušlechťování je jednou ze základních podmínek prokalení předmětu v celém průřezu (jinak dojde ke zhoršení mechanických vlastností v nedostatečně zakalené části průřezu), musíme nutně na součásti větších průřezů volit slitinové oceli.

### Tepelné zpracování rychlořezných ocelí

U těchto ocelí klesá následkem přísady velkého množství slitinových prvků (W, Cr, V, Mo, Co) maximální rozpustnost uhlíku v železe  $\gamma$ , takže i při obsahu uhlíku pod 0,8% se může u těchto ocelí vyskytnout ledeburitická struktura. Zároveň vlivem těchto prvků dochází k značnému posunu rozpadových křivek směrem doprava a k výraznému oddělení perlitické a bainitické přeměny.

U ocelí s vysokým obsahem karbidotvorných prvků, což jsou RO, není tvrdost po zakalení nejvyšší, ale až po popouštění na určitou teplotu. Mluvíme o tom, že tyto oceli se vyznačují tzv. **druhou (sekundární) tvrdostí**. Je to způsobeno tím, že po kalení homogenního austenitu zůstává ve struktuře velké množství zbytkového austenitu (až 70%), a mají tedy menší tvrdost. Při vyšších popouštěcích teplotách 400 až 600°C však tvrdost vlivem rozpadu zbytkového austenitu a precipitace velmi jemných karbidů přísadových prvků stoupá. Podmínkou pro vývoj druhé tvrdosti však je, aby kalící teplota byla dostatečně vysoká, zaručující dokonalé rozpuštění všech karbidů. Jsme-li nuceni u jemných nástrojů volit kalící teploty nižší, pak v tomto případě popouštíme nástroje jen na 130 až 180 °C.



Postup tepelného zpracování nástrojů z rychlořezné oceli

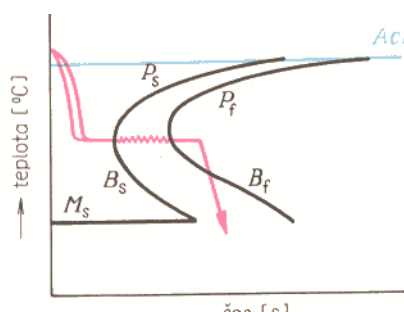
Ohřev se zpravidla děje ve dvou nebo třech stupních vzhledem k tomu, že rychlořezná ocel je citlivá na prudký ohřev. Kalí se podle velikosti průřezu součásti buď na klidném nebo proudícím vzduchu, nebo do oleje. Pouze oceli s vysokým obsahem W a Co (19 855) se kalí jen na vzduchu. Výhodné je použít termálního 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.

### Zvláštní způsoby tepelného zpracování

Následující způsoby TZ nepatří ani do skupiny žíhání, ani do kalení.

#### PATENTOVÁNÍ

Je to zvláštní případ izotermického rozpadu austenitu v lázních o teplotě 450 až 550°C. Struktura je tvořena směsí jemného perlitu a bainitu s vysokou houževnatostí, dovolující značné redukce průřezu při tváření za studena. Používá se při výrobě patentovaného drátu s vysokou pevností (pro lana, pružiny atd.).



Obr. 5-40.  
Schéma postupu patentování

## ROZPOUŠTĚNÍ - VYTVRZOVÁNÍ - STÁRNUTÍ

**Rozpouštění (rozpouštěcí žíhání)** používáme pro potlačení segregace u slitin neželezných kovů, u austenitických ocelí a některých dalších ocelí, které jsou vytvrzovatelné. Po ohřevu na žíhací teplotu, která zajistí vznik homogenního tuhého roztoku, následuje prudké ochlazení většinou do vody. U austenitických ocelí je žíhací teplota vždy vyšší než  $950^{\circ}\text{C}$  z toho důvodu, že v oblasti teplot 600 až  $850^{\circ}\text{C}$  vzniká zvláštní krystalická fáze, která způsobuje jejich zkřehnutí. Tento druh tepelného zpracování se označuje doplňkovou číslicí 1 (např. 17 246.1).

**Vytvrzování**, které bylo vyvinuto původně pro lehké slitiny (duraluminium), se rozšířilo na řadu dalších slitin neželezných kovů, (titanové slitiny) později i na austenitické oceli s vysokou pevností pro vysoké teploty. Vlastnímu vytvrzování předchází vždy rozpouštění. Jím se získá nestabilní přesycený tuhý roztok. Ten se buď za normální teploty (**přirozené vytvrzování**), nebo za zvýšené teploty (**umělé vytvrzování**) rozpadá uvnitř zrn. Při nižších teplotách probíhá rozpad tak, že se v určitých místech mřížky nahromadí větší počet atomů druhého prvku, při vyšších teplotách může dojít až k plné precipitaci. Oba jevy vedou k deformaci základní mřížky, což se navenek projeví zvýšenou pevností a tvrdostí a zpravidla i sníženou houževnatostí.

Někdy však tento jev probíhá proti naší vůli a pak hovoříme o **stárnutí**. Při něm zpravidla dochází k výraznému poklesu vrubové houževnatosti a jen k menšímu přírůstku pevnosti.

## Povrchové kalení

Pro toto zpracování se hodí uhlíkové a některé slitinové oceli s obsahem uhlíku mezi 0,45 - 0,60 %, které jsou kalitelné již na značnou tvrdost. Mohou proto v řadě případů vyhovět požadavkům na povrchovou tvrdost, jako např. u ozubených kol, čepů apod. Přitom oceli s tímto obsahem uhlíku se vyznačují ještě vyhovující houževnatostí a pevností jádra zejména, je-li součást před povrchovým kalením buď normalizačně vyžíhána nebo lépe zušlechťena. Jádro součásti, které není ovlivněno povrchovým kalením, si podrží vlastnosti předchozího tepelného zpracování.

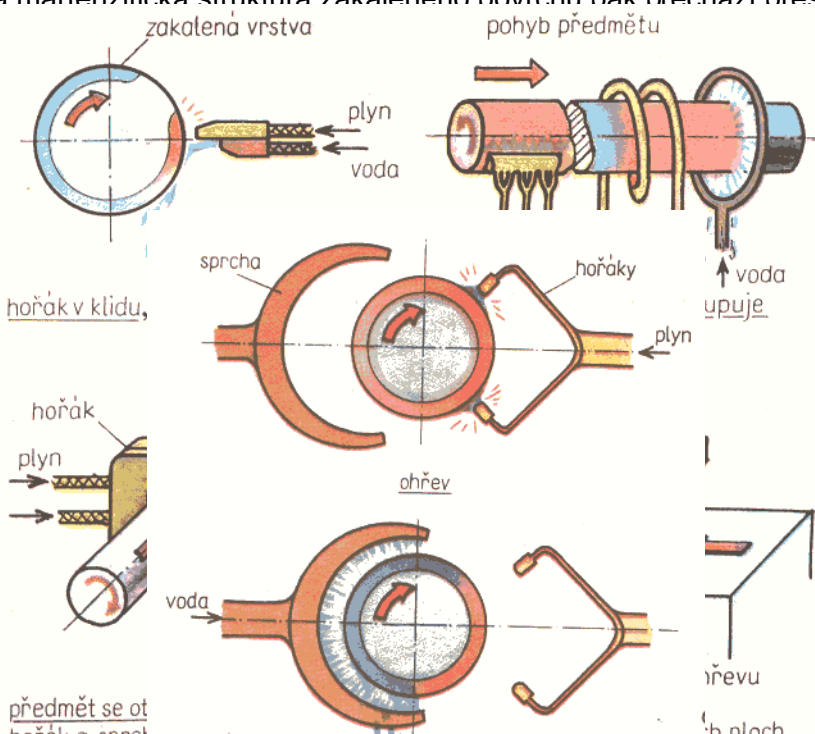
Za určitých podmínek je možno kalit také i oceli nástrojové, popř. odlitky ze šedé a tvárné litiny (např. vedení loží obráběcích strojů).

Při povrchovém kalení ohříváme povrchové vrstvy na austenitizační teplotu velmi rychle, s velmi krátkou výdrží na teplotě. Proto je teplota ohřevu značně vyšší než  $A_3$  a to podle způsobu ohřevu až o  $200^{\circ}\text{C}$  i více. Po ohřevu následuje ihned prudké ochlazení, nejčastěji vodou. Tvrdá martenzitická struktura zakaleného povrchu pak přechází přes smíšené rozpadové s jádrem způs

Podle způsobu kalení:

**1. plamene**  
ochlazení p  
přímo v těle  
požadované  
součásti m

**2. indukční**  
frekvence p  
trubky, kter  
Indukční po  
malé a nev



i povrchem a  
ty 150 - 250  $^{\circ}\text{C}$ .

e povrchové

o okamžitého  
ha umístěna  
ohřátí povrchu do  
ryb hořáku a

střední a vysoké  
ávitem z měděné  
stvy ( $t = 500^{\circ}\text{F}$ ).  
vu je okoupení

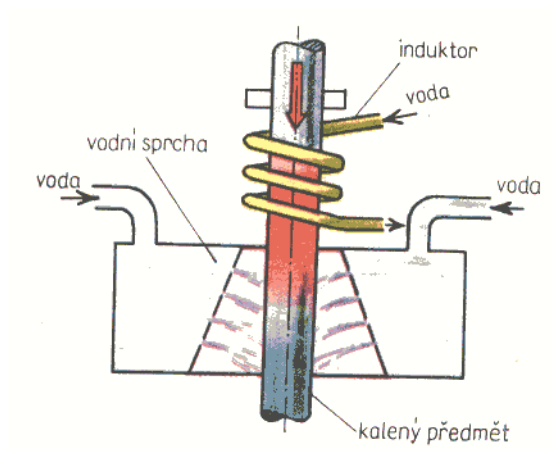


Schéma indukčního ohřevu a indukčního povrchového kalení.