

Základy metalografie a tepelného zpracování

Metalografie se zabývá pozorováním a zkoumáním vnitřní stavby čili struktury kovů a slitin. Stanovuje, jak tato struktura souvisí s chemickým složením, teplotou a tepelným nebo mechanickým zpracováním.

Vnitřní stavba kovů a slitin

Každá látka se skládá z atomů – kolik druhů prvků, tolik druhů atomů

Atom se skládá

- Kladně nabitá jádra – v nich je veškerá hmota atomu. Jádro se skládá z kladně nabitých **protonů** (počet protonů v jádře = atomové číslo prvku) a **neutronů** – bez elektrického náboje
- Kolem jádra obíhají záporně nabitá **elektrony** – jejich celkový záporný náboj se rovná kladnému náboji jádra. Hmotnost elektronů je zanedbatelná a jejich počet je stejný jako počet protonů. Elektrony jsou rozloženy kolem jádra ve **slupkách (sférách)** – je 7 sfér – 1 sféra je nejbližší k jádru a elektrony na ní mají nejmenší energii.

Z elektronového obalu se nejlépe uvolňují elektrony z nejbližší sféry. Mají největší energii a jsou nejméně přitahovány k jádru – nazývají se **valenční elektrony** – jsou příčinou slučivosti prvků.

Atom, který má ve vnější sféře méně než polovinu elektronů, tak je za určitých podmínek ztrácí, má-li jich více než polovinu tak doplňuje zbývající elektrony na plný počet na úkor jiných atomů. Tím je porušena elektrická rovnováha atomu. Z atomu vzniká kladně nabitý **ion (anion)**, nebo záporně nabitý **ion (kation)**. Kladně a záporně nabité ionty se dobře slučují.

Jednotlivé atomy tvoří větší celky – **molekuly**. Vzájemné vázání atomů nazýváme **chemickou vazbou** – dělíme ji:

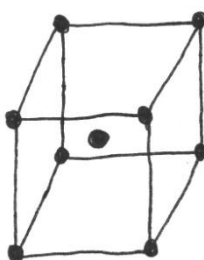
- **Iontová vazba** – spojení prvků s malou a velkou elektronegativitou, atomy si předávají elektrony - vzniklá molekula je silně polární
- **Kovalentní vazba** – prvky se stejnou elektronegativitou, elektrony navzájem sdílejí – vzniklá molekula je nepolární

- **Kovová vazba** – je charakterizovaná volně se pohyujícími elektrony, je typická pro kovy

Krystalová mřížka

Všechny kovy a slitiny v tuhém stavu jsou krystalické, tj. jsou složeny z krystalů, které vytvářejí jejich strukturu. Velikost a tvar krystalů jsou různé a mají vliv na vlastnosti kovů a slitin. Technicky důležité kovy krystalují nejčastěji v krychlové (kubické) a šesterečné (hexagonální) soustavě.

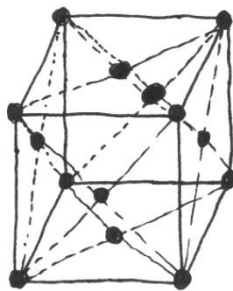
Krychlová prostorově středěná mřížka



9 atomů

V této soustavě krystalizuje železo α a δ , Cr, W, V, K, Mo, ... Většinou jde o kovy, které jsou za studena málo plastické.

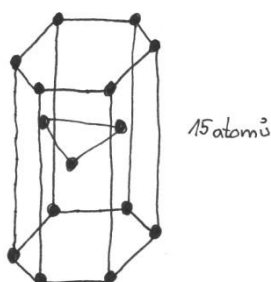
Krychlová plošně středěná mřížka



14 atomů

Těsnější uspořádání, takto krystalizuje – Al, železo γ , Pb, Cu, Ag, Au, ... Kovy s touto mřížkou jsou velmi tvárné

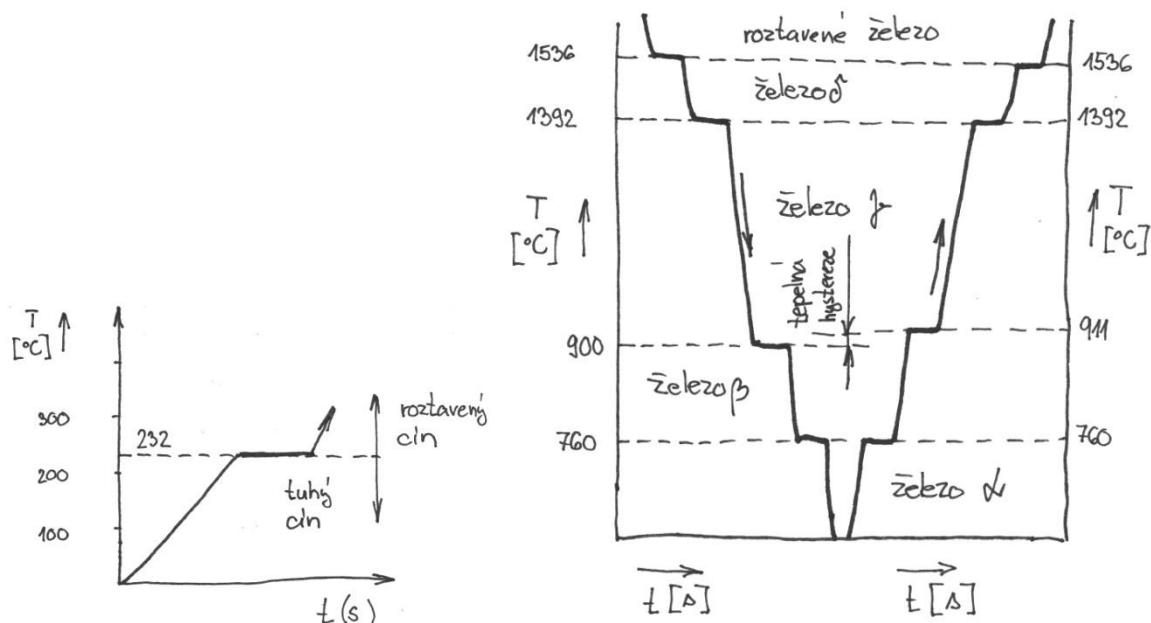
Šesterečná mřížka



V této soustavě krystalizuje Zn, Mg, Ti, Co, ...

Některé kovy a slitiny mají za různých teplot různou mřížku. Změnou mřížky se mění i jejich vlastnosti. Tuto přeměnu mřížek nazýváme **rekrytalizací** nebo **alotropickou přeměnou**, jev označujeme jako **polymorfii**. Jednotlivé krystalické stavy nazýváme **modifikacemi** a označujeme je řeckými písmeny. Modifikaci, která je stálá při teplotě okolí označujeme α , další β, γ, δ .

Chladnutí a ohřev čistých kovů



V diagramu ohřevu čistého kovu (např. cín) je při určité teplotě tzv. tepelná prodleva, při které je nutno dodávat teplo, aby došlo k modifikační změně materiálu (zde ke změně skupenství). Při ochlazování proběhne modifikační proměna v obráceném sledu – teplo se naopak uvolňuje.

U čistého železa se kromě prodlevy při teplotě tání (1539°C) objevují ještě prodlevy při teplotách 760° , 911° , 1392°C , kdy je železo ještě tuhá látka. Podobně se při křivce chladnutí kromě prodlevy při teplotě tuhnutí (1539°C) objeví prodlevy při

teplotách 1392° , 900° , 760°C . z toho vyplývá, že železo má 4 modifikace $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

Jedině železo α je magnetické, ostatní jsou nemagnetické.

Z diagramu je patrný rozdíl v teplotě při tuhnutí a ohřevu při modifikaci β na γ a

naopak. Tento rozdíl se jmenuje – **tepelná hystereze**.

Rovnovážný diagram železo uhlík

Pro technické slitiny železa s různým obsahem uhlíku je diagram ohřevu podobný, mění se jen teploty modifikačních proměn, při nichž nastává proměna (**překrystalizační teploty**), také tavení a tuhnutí neprobíhá za stálé teploty, ale v určitém intervalu teplot (kromě slitiny Fe s 4,3%C). Zaneseme-li teploty modifikačních proměn slitin železa s uhlíkem do diagramu (svislá osa – obsah uhlíku, svislá osa – teplota) vznikne tzv. **rovnovážný diagram** slitin železa a uhlíku.

V slitinách železa se vyskytuje uhlík jako **grafit**, nebo jako **cementit, tj. karbid železa (Fe₃C)**. Fe – Fe₃C – má větší význam pro technickou praxi .

- Na tomto diagramu lze sledovat průběh změn při ochlazování slitin železa s různým obsahem uhlíku.
- Při teplotách nad ACD – jsou všechny slitiny v tekutém stavu
- ACD – teplota začátku tuhnutí taveniny – **likvidus**
- AECF – teplota konce tuhnutí taveniny – **solidus**, při teplotě pod tuto teplotu – všechny slitiny v tuhém stavu
- Ochladuje-li se ocel s obsahem do 0,77% C z tekutého stavu, začne tavenina tuhnut při dosažení teploty likvidu, z taveniny se začnou vylučovat krystaly **austenitu** a to až do teploty odpovídající solidu, tavenina oceli je zcela ztuhlá, změnila se v austenit, ten se nemění až do teploty odpovídající teplotě A_{c3}, kdy se až do teploty 727°C vylučuje **ferit**, při dosažení teploty 727°C se zbylý austenit změní v **perlit**
- GS – začíná se vylučovat ferit – do teploty 727°C, dalším ochlazováním se nemění
- Při ochlazování oceli s 0,77%C – austenit se nemění až do teploty 727°C, pak se vše přemění na perlit, tzv. **eutektoid**
- U ocelí s obsahem 0,77% až 2,14%C se při teplotě, kterou udává čára SE, začnou vylučovat krystaly cementitu (sekundárního) a to do teploty 727°C, kdy se zbylý austenit změní na perlit, cementit se nemění
- U slitin železa s obsahem 2,14 až 4,3%C se tavenina do konce tuhnutí celá nezmění v austenit a při teplotě 1147°C dané čarou EC její zbytek ztuhne na **ledeburit** a sekundární cementit, při teplotě 727°C se austenit změní na perlit, ledeburit a cementit se nemění

- Tavenina se 4,3%C ztuhne najednou při teplotě 1147°C na ledeburit, tzv. **eutektikum**
- Tavenina obsahující 4,3 až 6,69%C se při teplotě dané čarou CD začnou vylučovat krystaly **primárního cementitu**, a to do teploty 1147°C, kdy zbylá tavenina ztuhne v ledeburit. Tento stav zůstane i pod teplotou 727°C
- ECF – eutektikála (1147°C) – při ní tavenina tuhne na ledeburit
- PSK – eutektoidála(727°C) – až do 4,3%C se mění zbylý austenit na perlit

V oblasti teplot nižších než 727°C se vyskytují různé strukturní složky:

- do 0,77%C – oceli **podeutektoidní** – krystaly feritu a perlitu – měkké – **oceli konstrukční** – houževnaté
- 0,77°C – **oceli eutektoidní** – jemné krystalky perlitu
- 0,77 až 2,14%C – **oceli nadeutektoidní** – jemné krystaly perlitu a tvrdé krystaly sekundárního perlitu – přirozená tvrdost – **oceli nástrojové**
- 2,14%C – hranice mezi kujnou ocelí (lze odlévat i tvářet) a nekujnou litinou (lze jen odlévat)
- 2,14 až 4,3%C – **podeutektické slitiny** – složena z krystalů perlitu, ledeburitu a sekundárního cementitu – většina litin
- 4,3%C – **eutektická slitina** – složena jen z ledeburitu
- 4,3 až 6,69%C – **nadeutektická slitina** – složena z ledeburitu a primárního cementitu

Litiny jsou křehké a málo pevné – mají velký obsah uhlíku v podobě grafitu(**šedá litina**), nebo cementitu(**bílá litina**)

Základní strukturní složky ocelí – **austenit, ferit, sekundární cementit**

Základní strukturní složky surových želez a litin – **primární cementit a grafit**

Ostatní strukturní složky – jsou z těchto složek složeny (perlit – jemné krystaly feritu a cementitu) nebo z nich vznikají (martenzit – rychlým ochlazením austenitu při kalení oceli)

Ferit je nejměkčí a cementit nejtvrďší součástí slitin železa.

Krystaly austenitu jsou měkké, houževnaté a tvárné – využívá se při tváření za tepla

Názvy struktur

Ferit – tuhý roztok C v železa α (tuhý roztok α)

Austenit – tuhý roztok C v železe γ (tuhý roztok γ)

Ferit δ - tuhý roztok C v železe δ

Cementit – karbid Fe_3C – 6,69%C

Ledeburit – eutektikum (austenit+cementit)

Perlit – eutektoid (ferit+cementit)

Cementit – primární I – vzniká z taveniny

- sekundární II – vzniká z austenitu

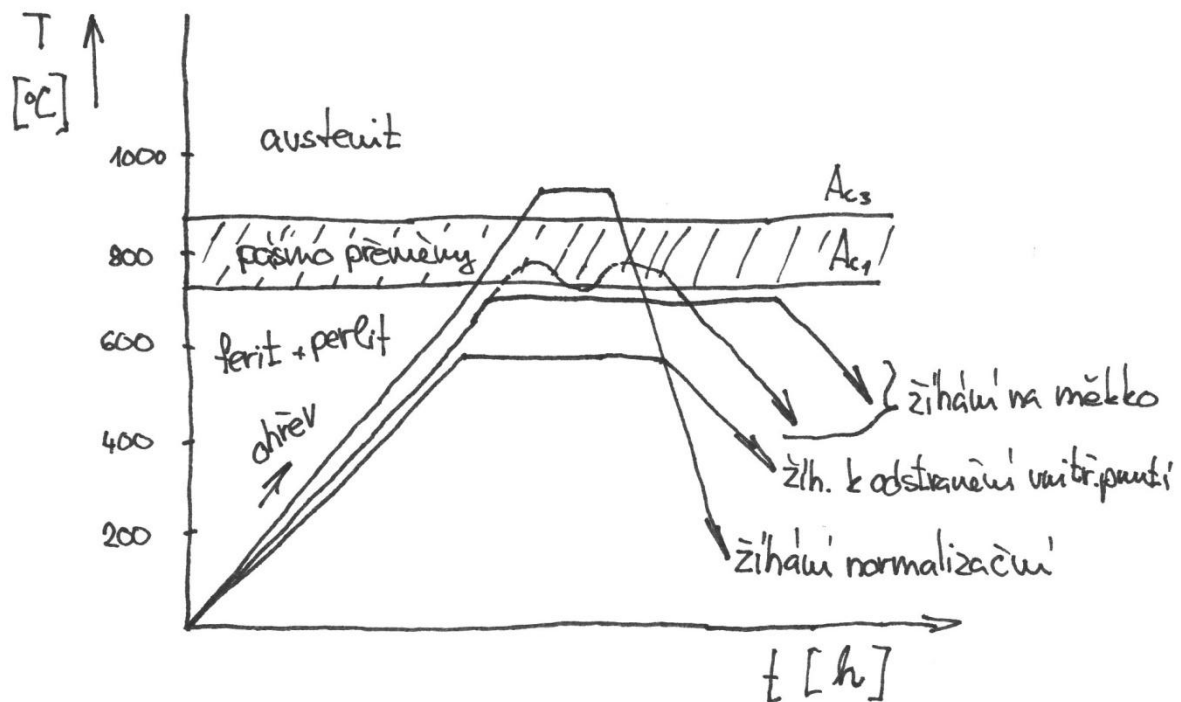
- terciální III – vzniká z feritu

Tepelné zpracování

Předmět nebo materiál v tuhém stavu se zahřívá a různě rychle ochlazuje, tím se mění jeho struktura, a tak se získávají požadované vlastnosti

Tepelné zpracování ocelí

Žihání – pomalý ohřev na teplotu žihání, setrvání po určitou dobu na této teplotě a pomalé ochlazení. Podle výše teploty, doby ohřevu a rychlosti ochlazení rozeznáváme:



Žihání k odstranění pnutí

- odstraňuje se pnutí v ocelích tvářených za studena, ve svařovaných součástech a v odlitcích

- teplota 450 až 600 °C, výdrž – 4 až 6 hod, pomalé ochlazování – nejlépe v peci

Žihání na měkko

- odstraňuje tvrdost ocelí před obráběním (oprava zakalených součástí)
- teplota 2 až 4 hod. těsně pod 727 °C, lze zkrátit ohřevem nad 727 °C, v obou případech je nutno ochlazovat co nejpomaleji

Normalizační žihání

- Odstranění nestejněměrné struktury vzniklé mechanickým obráběním, nebo hrubého zrna způsobeného přehřátím
- Dochází k překrystalizaci
- Ohřev 30 až 50 °C nad GSE (A_{c3}), dostatečně dlouhá prodleva, aby se dosáhl homogenní austenit a ochlazení na vzduchu (do 650 °C) a pak pomalu v peci

Rekrystalizační žihání

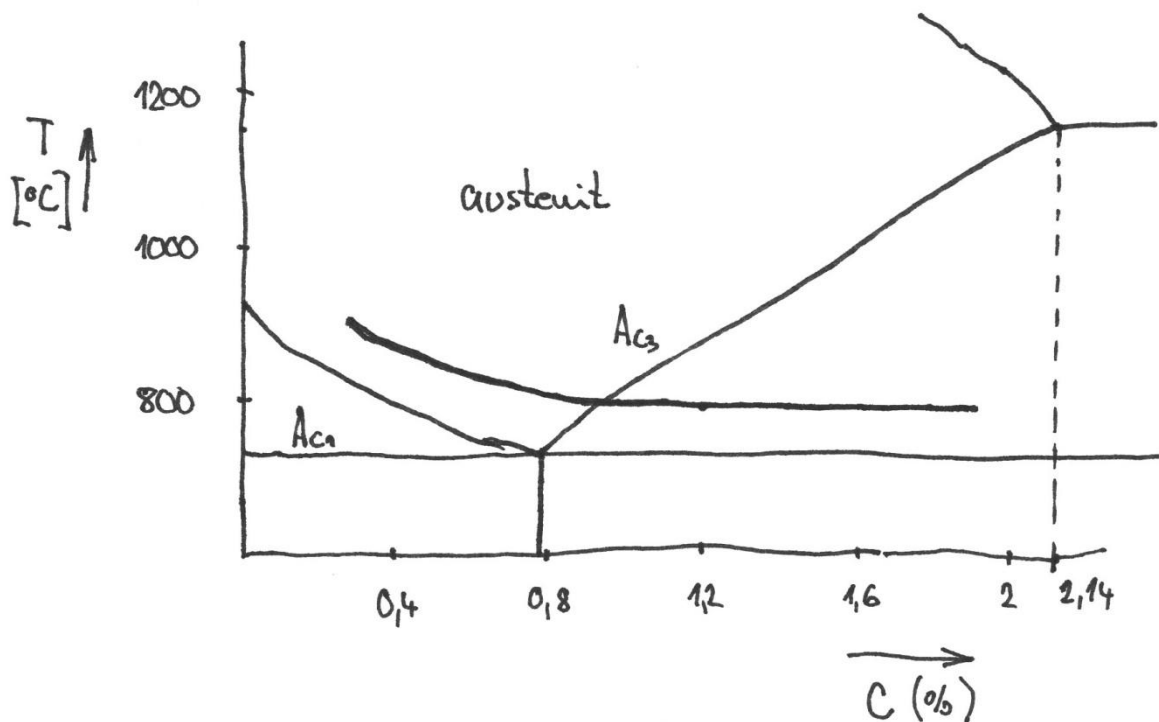
- Obnovení tvárnosti po předchozím zpevnění oceli tváření za studena
- Při rekrystalizaci jde o regeneraci (obnovení, zotavení) deformovaných zrn beze změny krystalografické mřížky
- Rekrystalizační teplota – 580 až 680 °C, a to v závislosti na stupni předchozí deformace, době žihání a původní velikosti zrn. (čím větší stupeň přetvoření, tím je nižší teplota, prodloužená doba žihání a jemnější původní zrno také snižuje teplotu)

Izotermické žihání

- Podobné výsledky jako u žihání na měkko a u žihání k odstranění prnutí
- Ohřev nad GSE (A_{c3}), rychlé ochlazení těsně pod 727 °C, prodleva a ochlazení na vzduchu

Kalení

Ohřev oceli nad teplotu rekrystalizace a rychlé ochlazení. Cílem je dosáhnout zvýšení tvrdosti oceli. U uhlíkových ocelí jsou teploty kalení o 30 až 50 °C vyšší než GSK, u slitinových ocelí vyšší (až 1320 °C).



- Účelem ohřevu odstranění feritu – dosažení stejnoměrné austenitické struktury – nutná určitá prodleva na kalící teplotě.
- Zvýšením teploty – přehřátí oceli – zhrubnutí zrna nebo dokonce spálení výrobku – zničení
- Rychlým ochlazením se má zabránit vyloučení feritu a přeměně austenitu na perlit, austenit se má přeměnit na tzv. **martenzit** – po cementitu nejtvrďší a nejkřehčí strukturní složka
- Každý materiál vyžaduje jinou rychlost ochlazování – tu dosáhneme pomocí látek s různou chladicí schopností. Nejrychleji ochlazuje voda, pak olej a nejpomaleji vzduch
- V zakalených předmětech vzniká velké pnutí – k předcházení kalíme termálně, či izotermicky

Termální kalení – ohřev na teplotu – prodleva – ponoření do lázně $200-300^{\circ}\text{C}$ – prodleva – ochlazení na vzduchu

Izotermické kalení – ohřátý předmět se ponoří do lázně 500°C , ponechá se déle (úplná přeměna austenitu na bainit). Tyto předměty se nepopouštějí.

Popouštění

Zmírňuje nežádoucí křehkost a vnitřní pnutí, zvyšuje houževnatost, na úkor tvrdosti. Popouštěný předmět se zahřeje na popouštěcí teplotu a ochladí se. Martenzit se mění na méně tvrdou strukturu (bainit)

- a) Popouštění za nízkých teplot – do 350°C, většinou u nástrojových ocelí
- b) Popouštění za vysokých teplot – 350 až 700°C – ve spojení s kalením, nazýváme **zušlechťování**.

Povrchové kalení

Ohřátí povrchu ocelového předmětu na teplotu kalení a jeho bezprostřední ochlazení. Ohřívá se plamenem nebo indukovaným elektrickým proudem, ochlazuje se vodou. Povrchově se kalí součásti, které mají mít tvrdý povrch (odolnost proti opotřebení) a měkké jádro (odolnost proti rázům)

Chemicko-tepelné zpracování – způsob zpracování, při němž se sytí povrch ocelí různými prvky, aby se dosáhlo různých požadovaných vlastností – žárovzdornost, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení atd.

Cementování

- Povrch součásti z měkké oceli (max. 0,3%C) nasycuje uhlíkem při teplotách 800 až 950°C na obsah 0,7 až 0,9%C. Zakalením této vrstvy se dosáhne velké tvrdosti, přičemž se zachová houževnaté jádro.
- Nauhličená vrstva bývá 0,5 až 1,5 mm.
- Zastaralý způsob nauhličování v pevném prostředí (směs dřevěného uhlí a uhličitanu barnatého BaCO_3) je pomalejší než v plynném prostředí (CO) nebo cementační lázni (solné lázně)

Nitridování

- Sycení povrchu slitinových ocelí dusíkem při teplotě 480 až 550°C
- Součást se vloží do vzduchotěsné elektrické pece, do níž se přivádí plynný amoniak (NH_3), ten se při styku s horkým kovem rozkládá na vodík a dusík. Dusík pak tvoří se slitinovými prvky (hlavně Al, Cr) z oceli nitridy, které dávají povrchu oceli velkou tvrdost.
- Výhoda – nižší teplota, nemusí se kalit – nenastává vnitřní pnutí a deformace

Alitování

- Sycení povrchu hliníkem – odolnost proti oxidaci za vyšších teplot

Inchromování

Sycení chromem – odolnost proti účinkům slané vody

Šerardování – sycení zinkem – odolnost proti škodlivým vlivům atmosféry

Tepelné zpracování neželezných kovů

Přichází v úvahu hlavně **rekrytalizační žihání** pro obnovení tvárných vlastností po předchozí deformaci za studena

Rekrytalizační teploty některých neželezných kovů: hliník-150°C, měď, stříbro - 200°C, nikl - 620°C, wolfram - 1210°C

Někdy se používá též **žihání ke snížení vnitřního pnutí** – teploty jsou nižší než teploty rekrytalizační

Vytvrzování - zlepšení vlastností hlavně hliníkových slitin. Zakalením, tj. rychlým ochlazením slitiny se získá houževnatá a měkká slitina, jejíž pevnost se zvyšuje popouštěním (tzv. stárnutím). Stárnutí je buď přirozené (na vzduchu) nebo se může urychlit ohřátím a výdrží na určité teplotě.

Zařízení pro tepelné zpracování

- jsou to různé pece, které umožňují ohřev předmětů (až na 1300°C) i pomalé chladnutí. Jsou vytápěné -plynem (svítiplyn, koksárenský, vysokopecní plyn), tekutinovými palivy (topné oleje, nafta) nebo elektrickým proudem – nejlépe regulovatelný.

Pro ohřev drobných předmětů vhodné – solné lázně – rychlý a stejnoměrný ohřev.

K ohřívání předmětů na popouštěcí teploty se používají zpravidla lázně – **olejové** (asi do 250°C), **kovové** (slitiny Pb, Sn), **solné** (nad 250°C)

Použitá literatura

M. HLUCHÝ, O. Modráček, R. Paňák. *Strojírenská technologie 1: Metalografie a tepelné zpracování*. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-7183-140-9.

MIROSLAV HLUCHÝ A KOLEKTIV. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu*. Praha: SNTL, 1978. ISBN 04-212-78.