

Struktura, vlastnosti a zpracování kovů

Petr Šidlof

Základní vlastnosti kovových materiálů

- pevné a tvrdé
- tvárné
- vysoká elektrická a tepelná vodivost
- většinou relativně vysoká hustota

Li .. 530 kg/m³

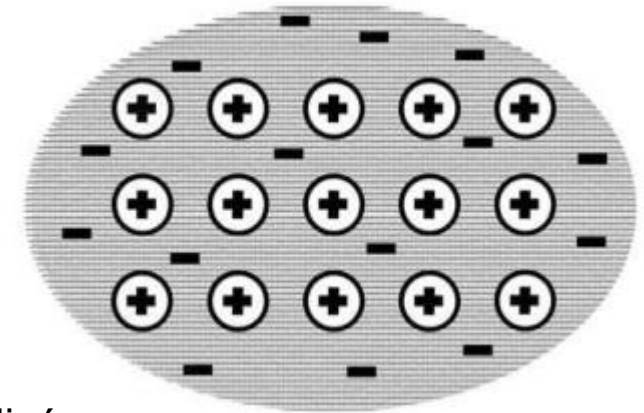
Fe .. 7800 kg/m³

Os .. 22600 kg/m³

Většina prvků periodické tabulky (cca 90 ze 120) jsou kovy. V praxi se používají zejména slitiny kovů

Struktura kovů – atomová úroveň (1)

Kovová chemická vazba – uspořádané kationty,
delokalizované elektrony



Klasická elektronová teorie kovů (1900)

- sféricky symetrické ionty
- elektronový plyn – valenční elektrony volně pohyblivé
- objasňuje elektrickou vodivost a některé optické vlastnosti
- nevysvětluje, proč mají různé kovy různou vodivost, chybný odhad tepelné kapacity

Kvantová teorie volných elektronů (1928)

- energie elektronu v potenciálové jámě je kvantována
- u kovů se při běžných teplotách řídí elektronový plyn kvantovou statistikou
- kvantová teorie vysvětluje a správně kvantifikuje tepelnou kapacitu kovů

Struktura kovů – atomová úroveň (2)

Pásová teorie kovů (1930)

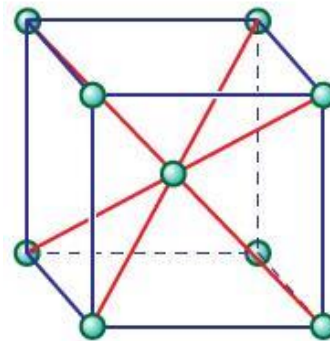
- energetické pásy s dovolenými a zakázanými hodnotami energie (na základě kvantově mechanických vlnových funkcí elektronu)
- uspokojivě vysvětluje vodivost, barvu kovů



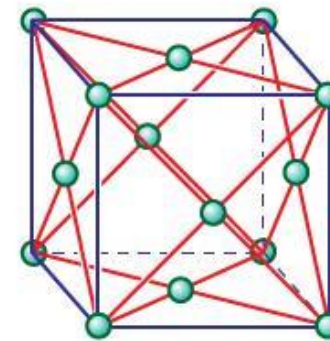
Krystalická struktura kovů (1)

Kovy jsou krystalické materiály. Z toho plyne podstatná část jejich vlastností.

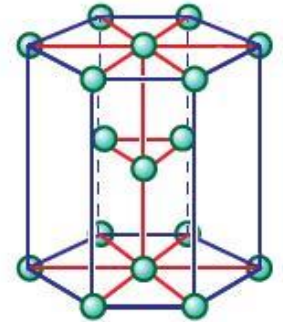
Common metallic crystal structures



body-centred cubic (bcc)



face-centred cubic (fcc)



hexagonal close-packed (hcp)

© 2011 Encyclopædia Britannica, Inc.

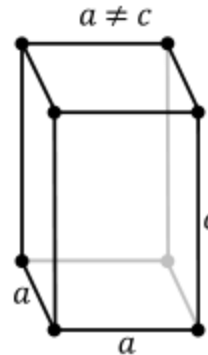
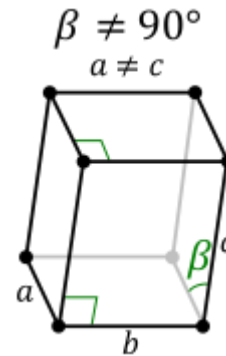
Nejčastější typy mřížek u kovů

- kubická prostorově centrovaná (body-centered cubic, **bcc**): α -Fe, Mo, Cr, W, V
- kubická plošně centrovaná (face-centered cubic, **fcc**): γ -Fe, Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pt
- hexagonální těsně uspořádaná (hexagonal close packed, **hcp**): γ -Ti, Zn, Mg, Cd

Krystalická struktura kovů (2)

Méně běžné typy mřížek u kovů

- monoklinická: plutonium
- tetragonální (β -cín, při teplotách nižších než 13.2°C)



Krystalická struktura kovů (3)

Kovová vazba má nesměrový charakter, atomy v mřížce si lze představit jako těsně uspořádané koule v prostoru.

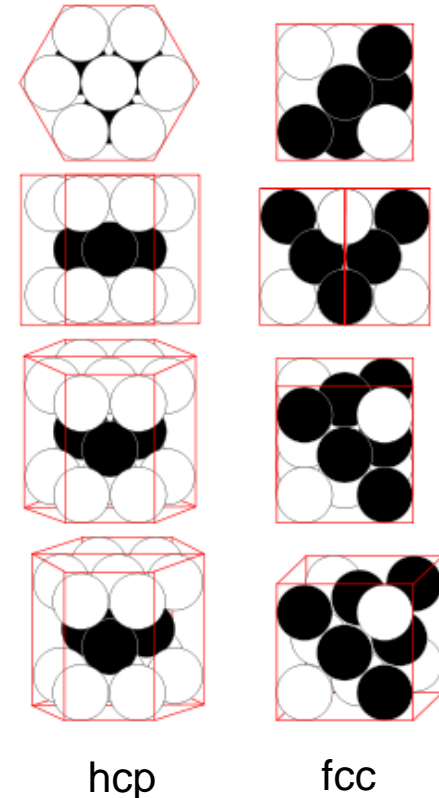
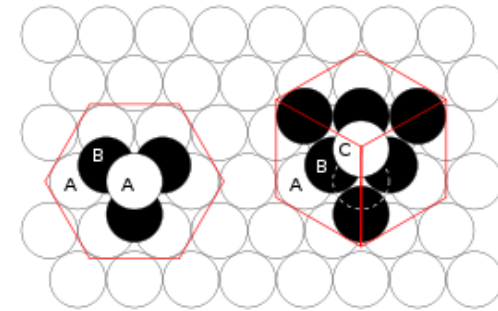
Nejtěsnější uspořádání v prostoru má mřížka hcp a fcc (74%).
U bcc již není dosaženo maximálního vyplnění prostoru.

Atomový a iontový poloměr

minimální vzdálenost, na kterou se dvě strukturální jednotky (atomy, ionty) mohou přiblížit.

Řádově $0.1 \text{ nm} = 1 \text{ \AA} \text{ (ångström)} = 10^{-10} \text{ m}$

- $\text{Fe}^0 \dots 0.126 \text{ nm}$
- $\text{Fe}^{2+} \dots 0.080 \text{ nm}$
- $\text{Fe}^{3+} \dots 0.067 \text{ nm}$
- $\text{Pb}^0 \dots 0.174 \text{ nm}$
- $\text{Pb}^{4-} \dots 0.215 \text{ nm}$
- $\text{Pb}^{4+} \dots 0.070 \text{ nm}$



Poruchy krystalové mřížky

Reálný krystal vždy obsahuje jistou koncentraci poruch

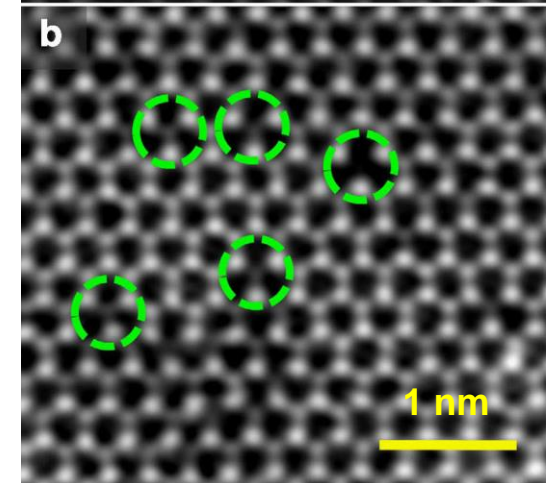
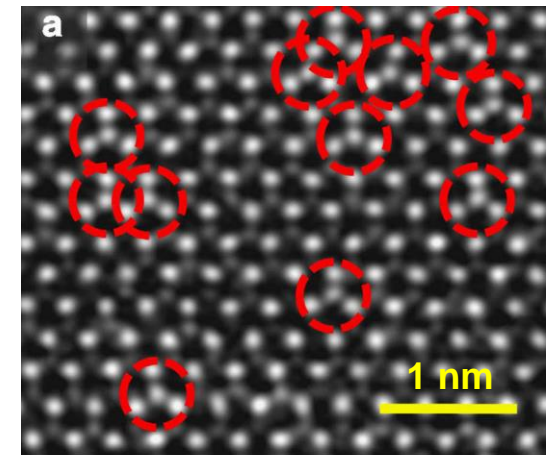
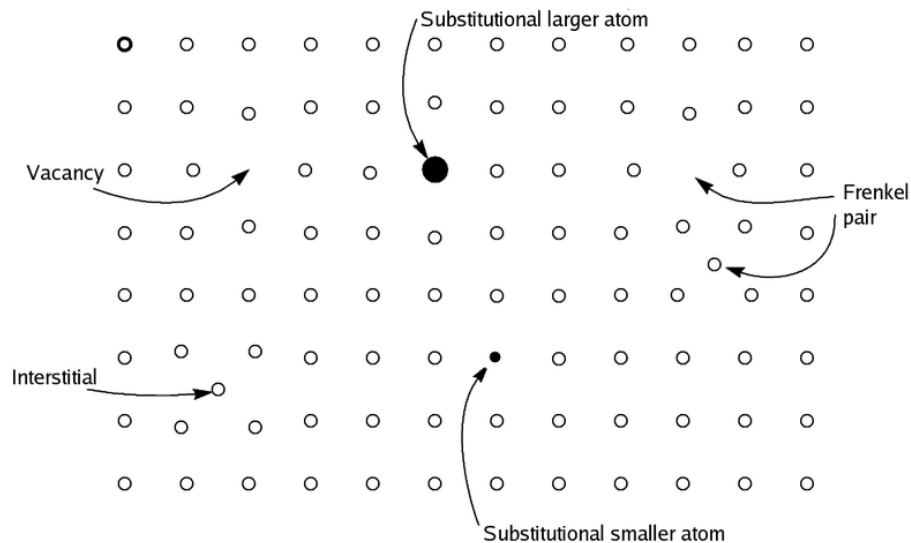
- téměř dokonalé krystaly polovodičů (Si, Ge) – do 1%
- běžné krystalické materiály – několik procent
- velmi defektní krystal – 10%

Typy poruch krystalové mřížky

- bodové
- čarové
- plošné
- objemové

Bodové poruchy

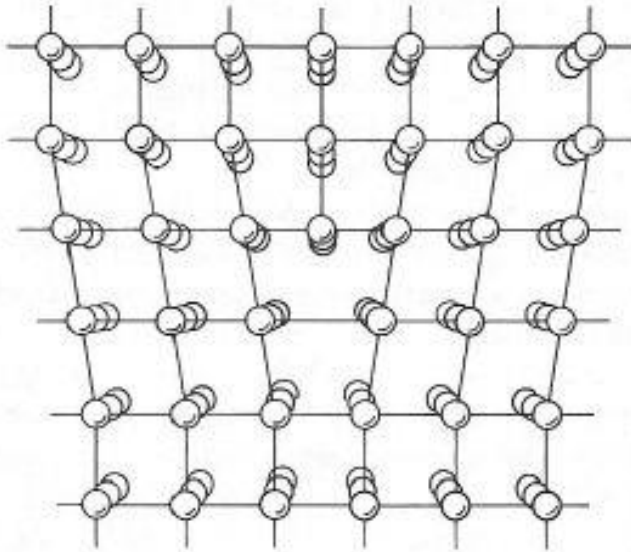
- vakance (chybějící atom)
- intersticiál (vmezeřený vlastní atom)
- substituce (cizí atom v poloze mřížky)
- adice (cizí atom v intersticiální poloze)
- Frenkelův pár (vakance-intersticiál)



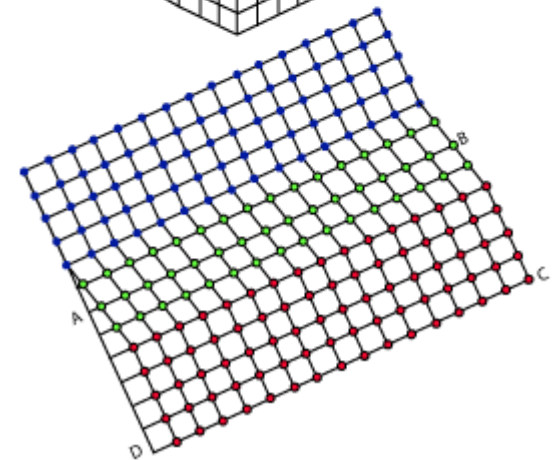
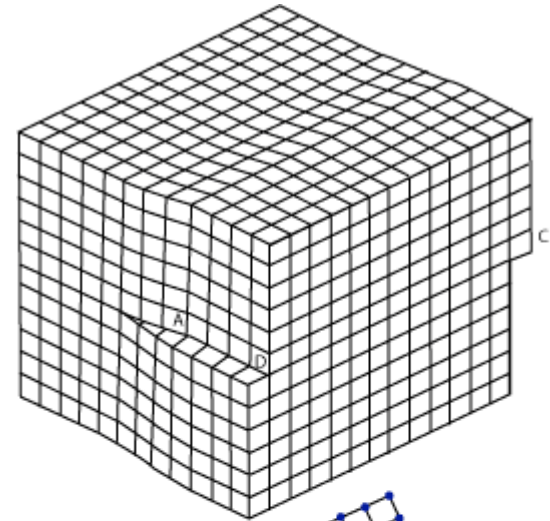
Monovrstva MoS₂ – snímek z elektronového mikroskopu.
(a) Substituce (Mo v polohách S)
(b) Vakance (chybějící S)

Bodové poruchy umožňují **difuzi** – pohyb částic nebo vakancí v mřížce. Difuze je výrazně tepelně aktivovaný proces

Čarové poruchy – dislokace

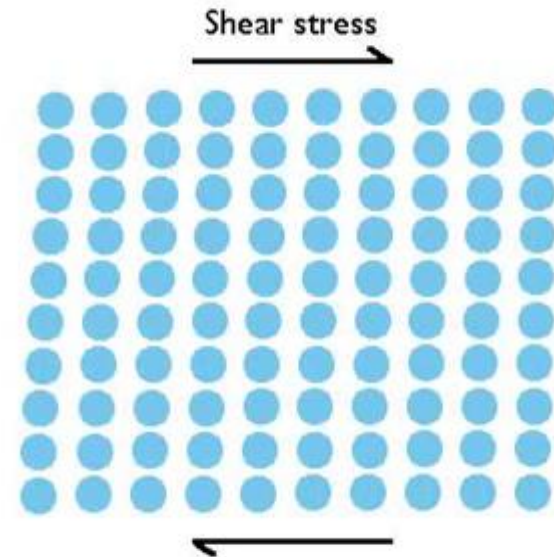
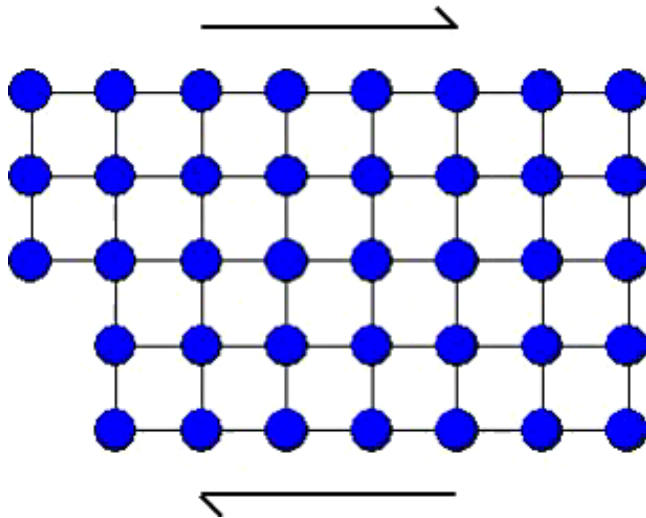


hranová dislokace



šroubová dislokace

Pohyb hranových dislokací



Pohyb dislokací – primární mechanismus plastické deformace kovů. Další mechanismy –
pokluz po hranici zrn

Mikrostruktura kovů

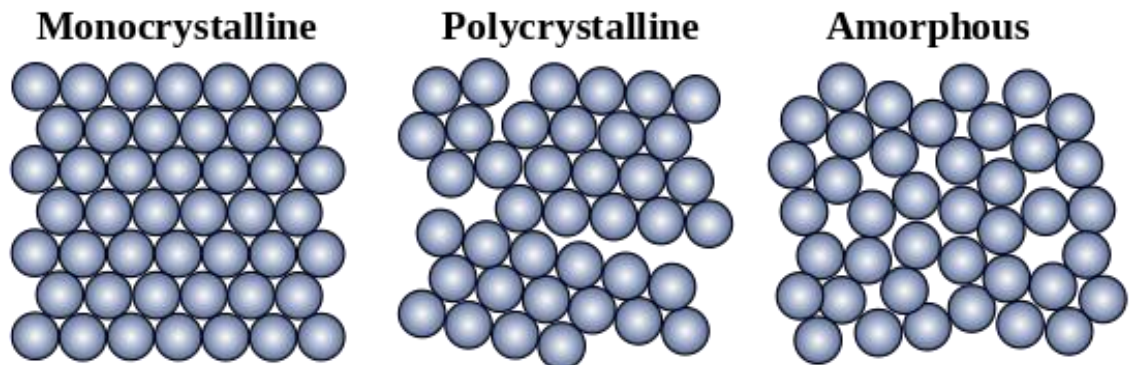
Fáze .. útvar (část materiálu) s jednotným chemickým složením, krystalickou strukturou a fyzikálními vlastnostmi. Oddělena od okolních fází fázovým rozhraním

Příklad – možné fáze u čistého železa:

- α -železo (ferit) - do 910°C: bcc, ferromagnetické (do Curieho teploty 770°C)
- γ -železo (austenit) – 910-1400°C: fcc, paramagnetické
- δ -železo (δ -ferrit) – 1400-1539°C: opět bcc
- tavenina - nad 1539°C: viskozní kapalina
- (teor.) plyn: nad 2862°C
- ϵ -železo – za extrémních podmínek ($p > 10\text{GPa}$): hcp (vnitřní zemské jádro)

Mikrostruktura kovů – čisté kovy

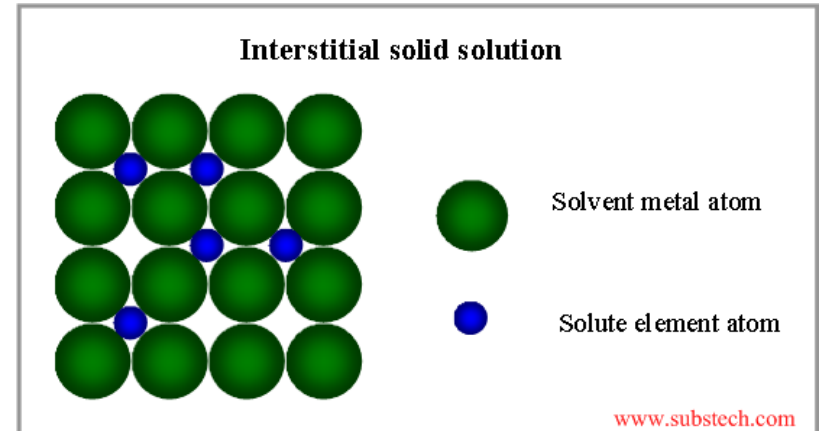
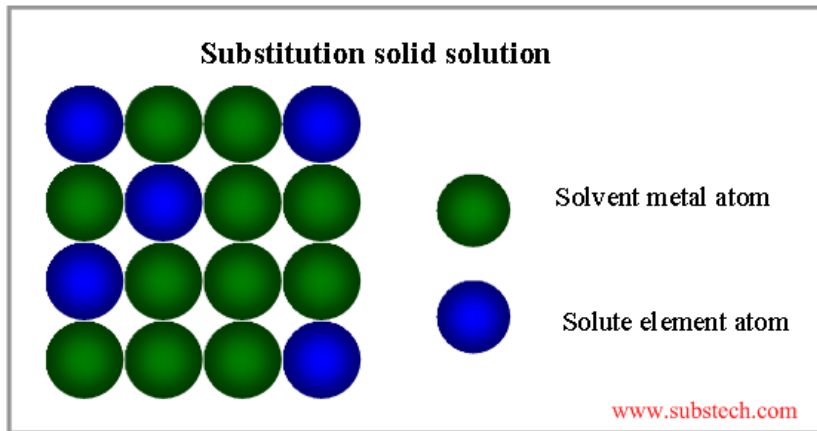
- obsahují pouze jedinou fázi – jednofázové materiály
- skládají se z krystalů – oblastí, které se mezi sebou liší pouze orientací krystalové mřížky. Všechny technické kovové materiály jsou **polykrystalické**
- tvar a velikost zrn výrazně ovlivňují vlastnosti kovu



Mikrostruktura kovů – slitiny

Tuhé roztoky

- jediná fáze obsahující dvě složky
- krystalická mřížka se shoduje s mřížkou jedné ze složek
- mřížkové parametry jsou spojitou funkcí chemického složení
- substituční (např. Ag-Au, Au-Cu) / intersticiální (Fe-C)



Mikrostruktura kovů – slitiny

Intermetalické fáze

- „sloučeniny“ základního kovu A s legujícím prvkem B
- označení chemickým vzorcem A_xB_y
- v některých případech existují v určitém rozmezí koncentrace legujícího prvku
- obvykle se výrazně liší krystalickou strukturou i fyzikálními vlastnostmi jak od zákl. kovu A, tak od legujícího prvku B

Příklad: karbid železa Fe_3C .. častá fáze v ocelích

U nekovových materiálů se používá termín *intermediální fáze*

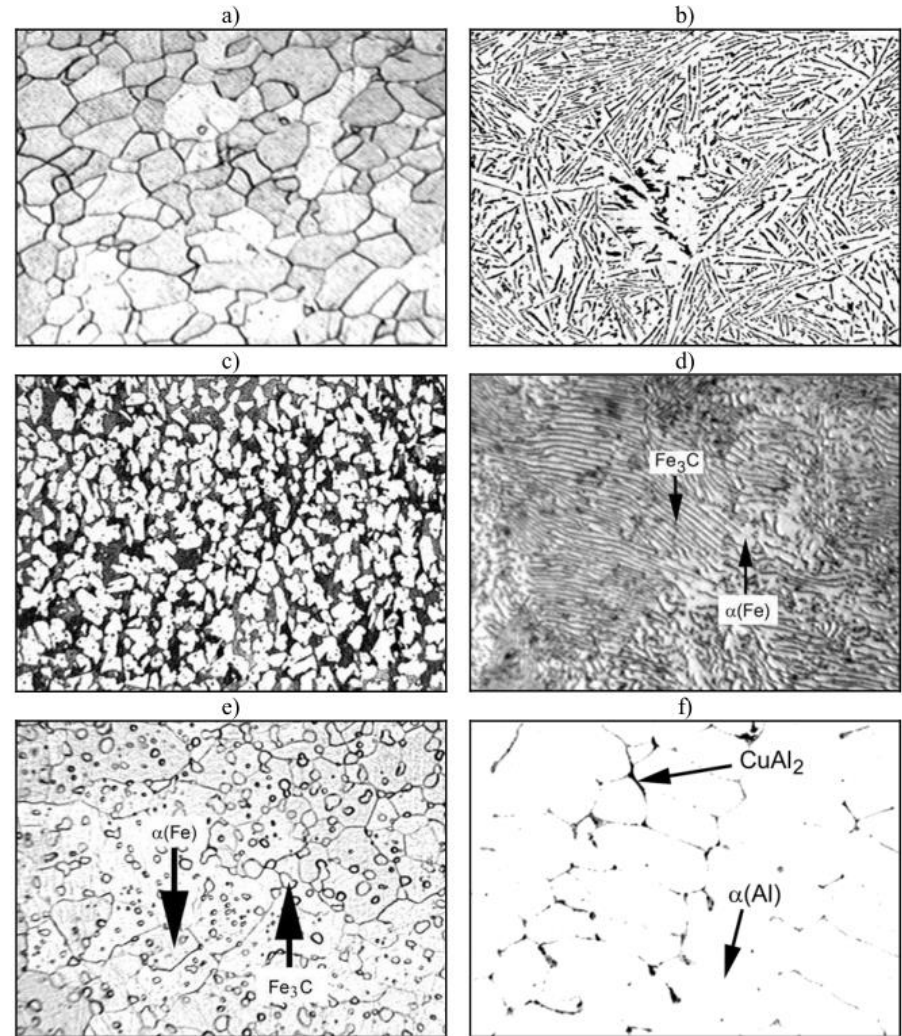
Mikrostruktura kovů – slitiny

Jak vznikne slitina:

Ztuhnutí směsi roztaveného základního kovu A a legujícího prvku B (případně více legur).

Komplexní struktura – v závislosti na podmínkách může obsahovat více fází

- nízká koncentrace B: jednofázový tuhý roztok s mikrostrukturou podobnou čistému kovu A (a)
- vyšší koncentrace B než maximální rozpustnost: vícefázový materiál A+B (b), nebo častěji
- vícefázový materiál A + intermetalická fáze $A+A_xB_y$ (c, d, e, f)



Obr.10.3. Příklady mikrostruktur slitin: a) čisté železo tvořené zrný s různou orientací krystalických mřížek, b) slitina AlSi10 (hm.%) – fáze $\alpha(\text{Al})$ (světlá) + Si (tmavá), c) slitina CuZn40 (hm.%) – fáze $\alpha(\text{Cu})$ (světlá) + CuZn (tmavá), d) ocel obsahující 0,8 hm.% C – fáze $\alpha(\text{Fe})$ + karbid triželeza Fe_3C , e) vyžíhaná ocel obsahující 0,8 hm.% C – fáze $\alpha(\text{Fe})$ + karbid triželeza Fe_3C f) slitina AlCu2 (hm.%) – fáze $\alpha(\text{Al})$ (světlá) + CuAl_2 (tmavá)

Rovnovážné stavy a fázové diagramy

Některé typy chování materiálů nelze vysvětlit „selským rozumem“:

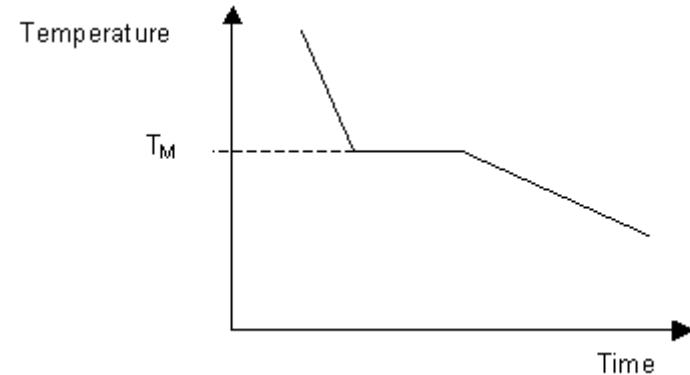
- čistý kov a některé slitiny mají ostrý bod tuhnutí. Většina slitin ale tuhne v rozmezí teplot
- $T_m(\text{Sn}) = 232^\circ\text{C}$, $T_m(\text{Pb}) = 327^\circ\text{C}$. $T_m(\text{Sn}_{0.62}\text{Pb}_{0.38}) = 183^\circ\text{C}$
- mechanické vlastnosti slitin jsou často výrazně lepší, než mechanické vlastnosti obou složek (např. AgCu má zhruba dvakrát vyšší tvrdost než Ag i Cu)

Vysvětlení: **fázové diagramy**

Fázové diagramy – křivka chladnutí

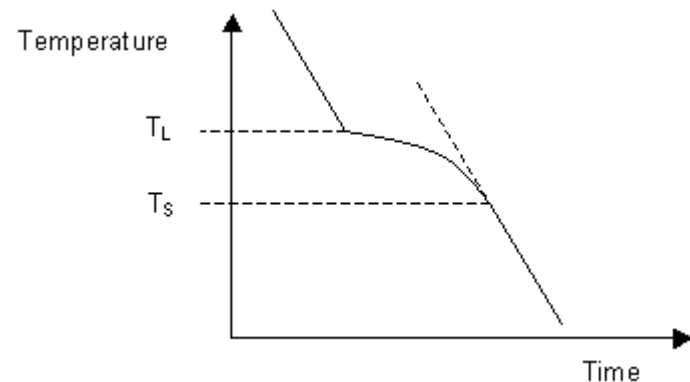
Jednokomponentní systémy – čisté kovy

- tavenina (liquidus – L) a pevná fáze (solidus – S) mohou existovat v rovnováze pouze při teplotě tání, T_M



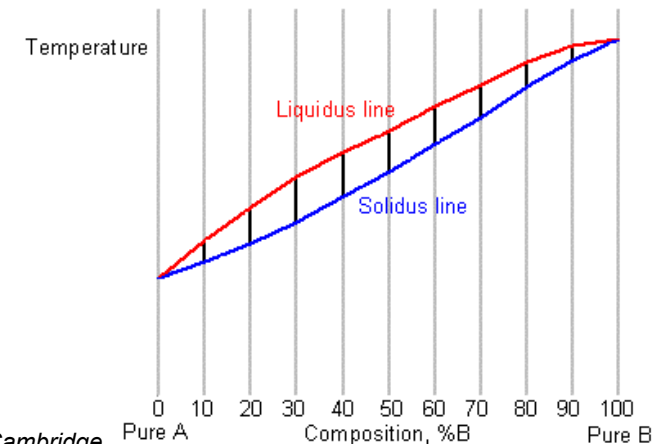
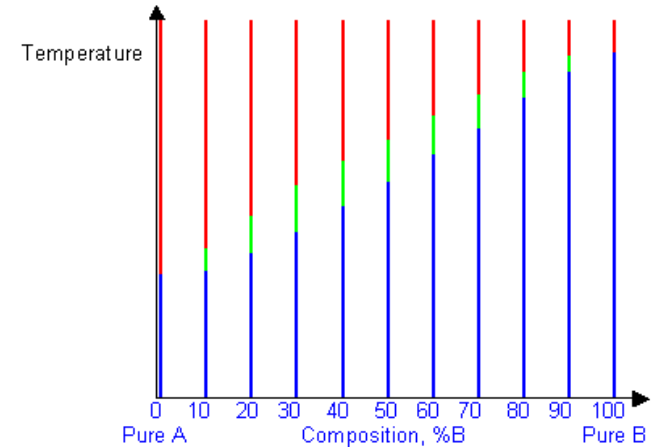
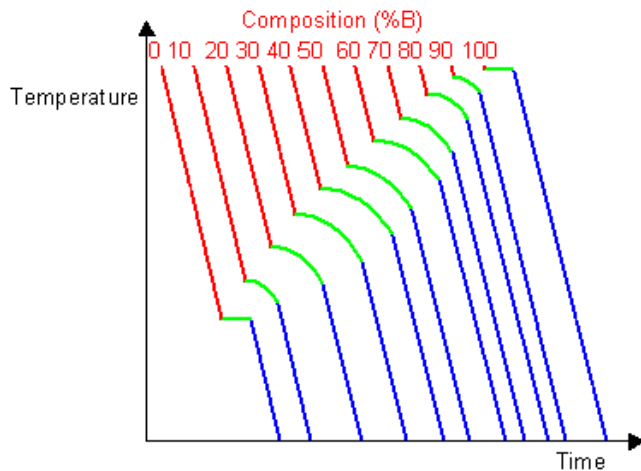
Binární slitiny

- tavenina tuhne v rozsahu teplot, teplota tání není definovaná
- v rozmezí T_L a T_S existuje v rovnováze tavenina i pevná fáze



© DoITPoMS, University of Cambridge

Fázové diagramy – konstrukce z křivek chladnutí



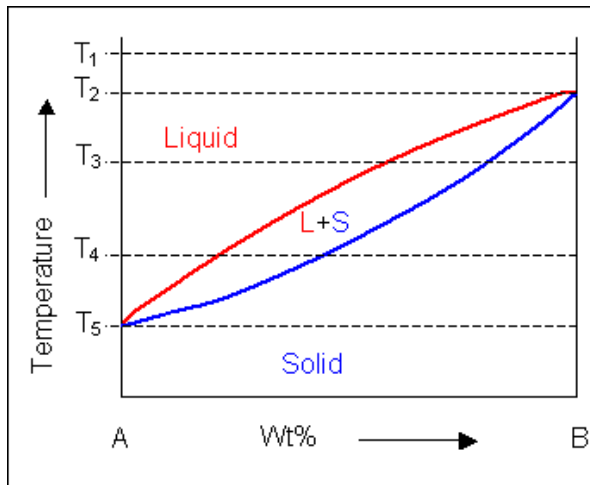
Zde nejjednodušší fázový diagram pro dva kovy s neomezenou rozpustností.

Možné pokud kovy mají

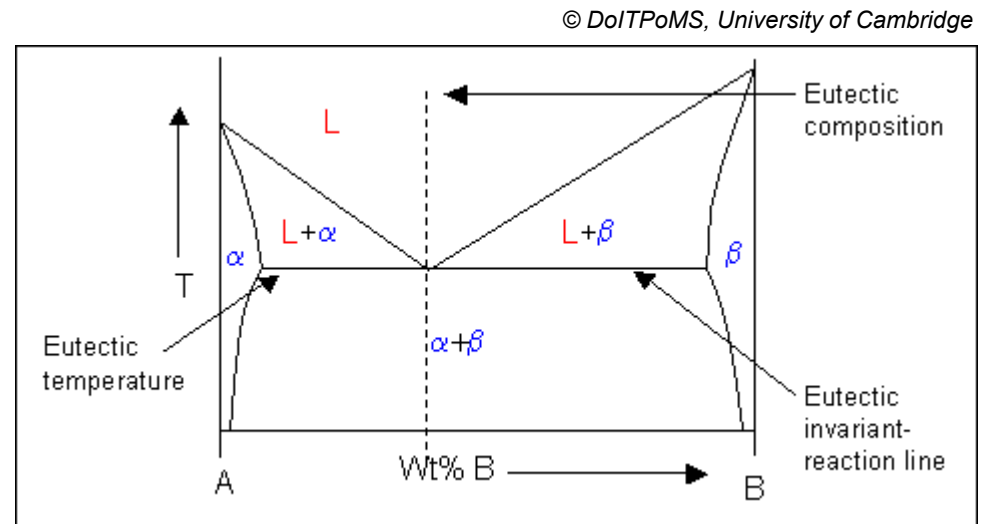
- stejnou krystalickou mřížku
- podobné atomové průměry
- stejnou valenci

Fázové diagramy – eutektické binární systémy

- ve většině slitin mají složky pouze částečnou rozpustnost
- tuhý roztok (jednofázový materiál) existuje pouze v jistých koncentračních mezích
- mimo tyto meze jsou ve slitině přítomné **dvě fáze**

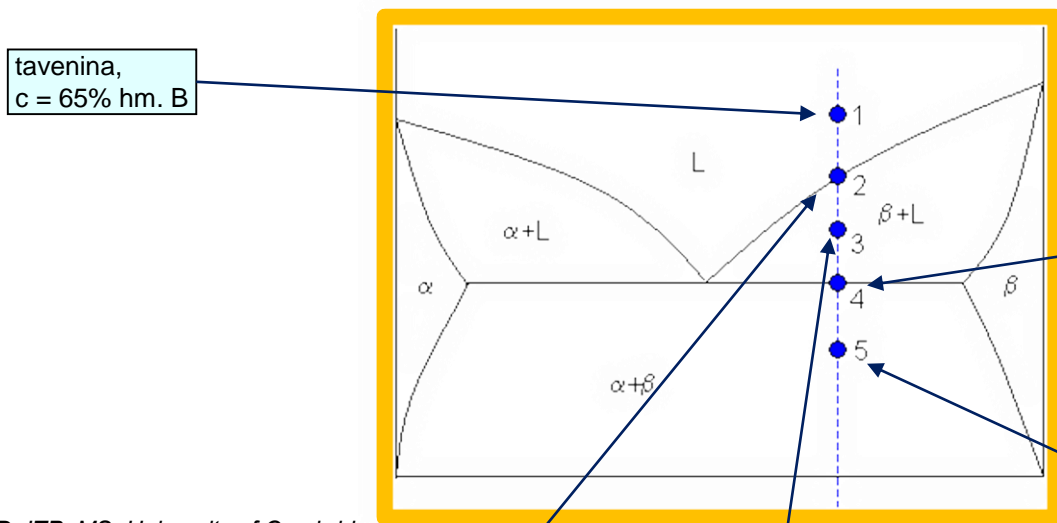


Jednoduchý binární systém s
neomezenou rozpustností
(např. Cu - Ni)

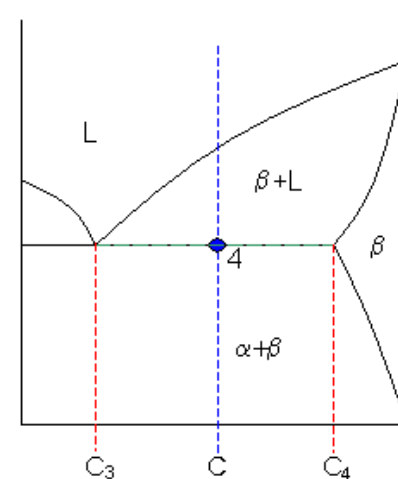


Eutektický binární systém s omezenou rozpustností
(např. Ag - Cu)

Fázové diagramy – interpretace, pákové pravidlo

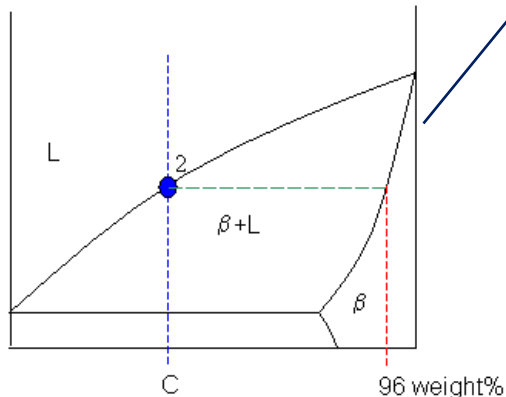


tavenina,
 $c = 65\%$ hm. B

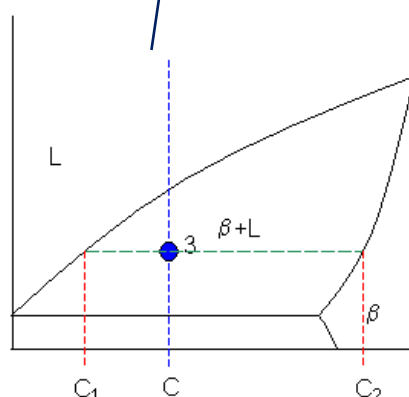


zbyvajících 56% taveniny tuhne do eutectické směsi $\alpha+\beta$ ($c_3 = 48\%$); 44% fáze β ($c_4 = 87\%$)

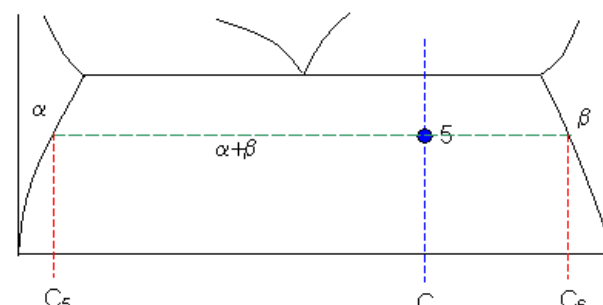
© DoITPoMS, University of Cambridge



tavenina ($c = 65\%$)
 začátek vylučování fáze β ($c = 96\%$)



80% taveniny ($c_1 = 58\%$)
 20% fáze β ($c_2 = 92\%$)



32% fáze α ($c_5 = 9\%$); 68% fáze β ($c_6 = 91\%$)

Fázové diagramy – vliv kinetiky na mikrostrukturu

- v průběhu tuhnutí roztoku se mění koncentrace jednotlivých fází
- řídicí mechanismus pro změnu koncentrace složek je **difuze**
- fázové diagramy ukazují poměry a koncentrace jednotlivých fází pro případ **stabilního stavu**, tj. kdy je na difuzní výměnu dost času .. pomalé chlazení
- rychlé ochlazení – „zamrznutí“ metastabilního stavu

Vlastnosti a zkoušení kovových materiálů

Mechanické vlastnosti

- pevnost, tažnost – elastická a plastická deformace, vztah mezi napětím a deformací (tahová zkouška na zatěžovacím stroji – trhačce)
- tvrdost (vtlačení indentoru do povrchu tělesa – tvrdoměry)
- lomová houževnatost, křehkost (statické a dynamické zatěžovací stroje, Charpyho kladivo)

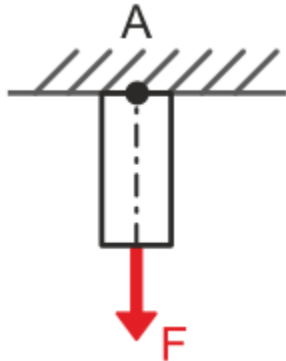
Ostatní fyzikální vlastnosti

- elektrická vodivost (stříbro > **měď** > zlato > **hliník**)
- tepelná vodivost (přibližně úměrná elektrické vodivosti)
- optické vlastnosti – barva, vysoká odrazivost leštěných kovových povrchů
- ferromagnetické chování – železo, kobalt, nikl a jejich slitiny
- teplotní roztažnost

Deformační chování kovů (1)

Při působení síly (napětí) se materiál deformuje, tj. mění tvar. Existuje mnoho druhů namáhání (tah a tlak, ohyb, krut, smyk..).

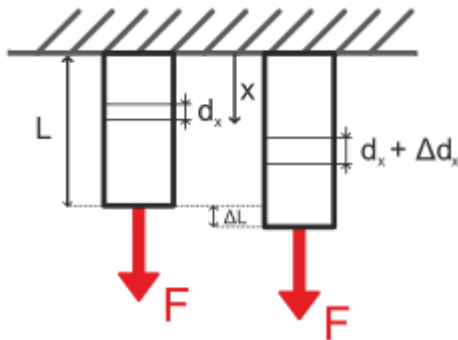
Napětí



$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]}$$

- 1 MPa .. 0.1kg / mm²
- typické velikosti napětí .. desítky až stovky MPa

Deformace

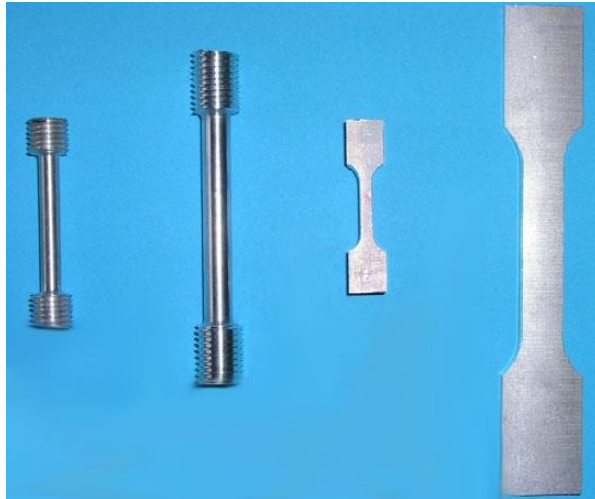


$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \text{ [\mustrain, \%]}$$

- 1 μstrain .. 1 μm/m
- typické velikosti deformace .. desítky až stovky μstrain

Deformační chování kovů (2)

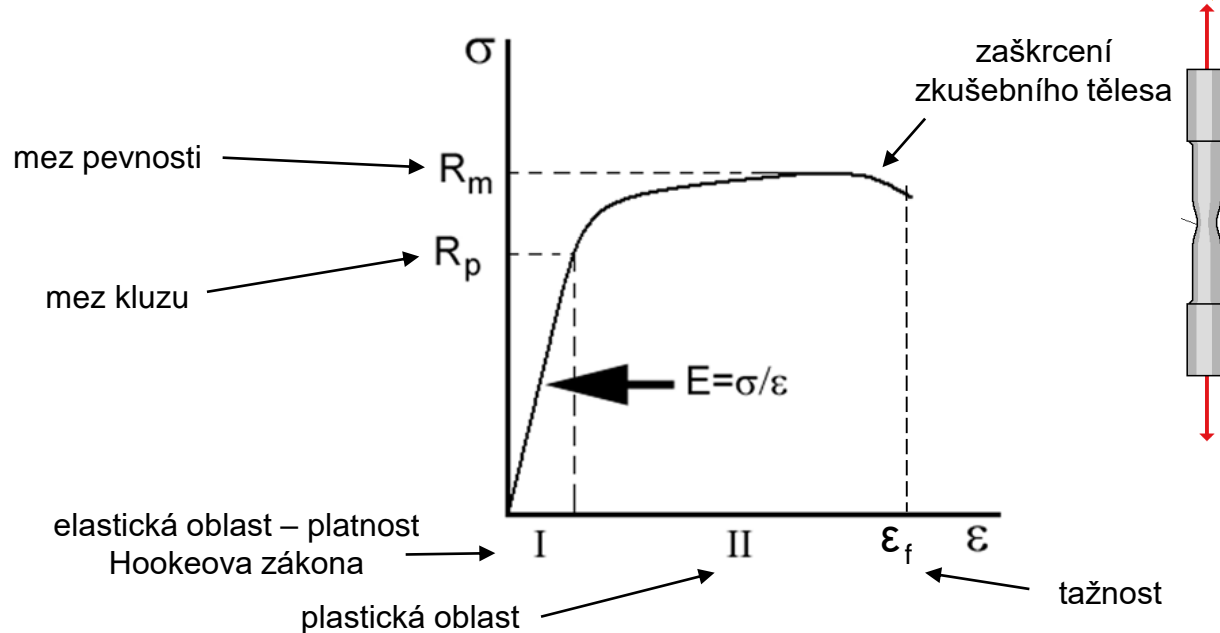
Vztah mezi deformací a napětím ukazuje **tahový diagram**, který lze změřit na **zatěžovacím stroji (trhačce)**



zkušební tělesa pro tahovou zkoušku



Deformační chování kovů (3) – pevnost, tahový diagram



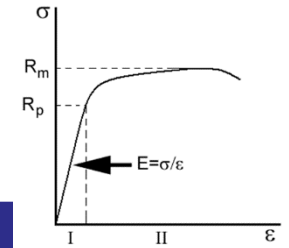
© Hochschule Karlsruhe

Poznámky

- plastická deformace je nevratná, v materiálu akumuluje poškození
- mez kluzu lze zvýšit ovlivněním mikrostruktury zablokováním pohybu dislokací – **zpevnění**
 - zpevnění legováním (tuhý roztok nebo intermetalické fáze blokuje pohyb dislokací)
 - zpevnění hranicemi zrn (jemnozrný materiál – hranice blokuje pohyb dislokací)
 - deformační zpevnění (akumulace dislokací – elastické pole brání pohybu dislokací)



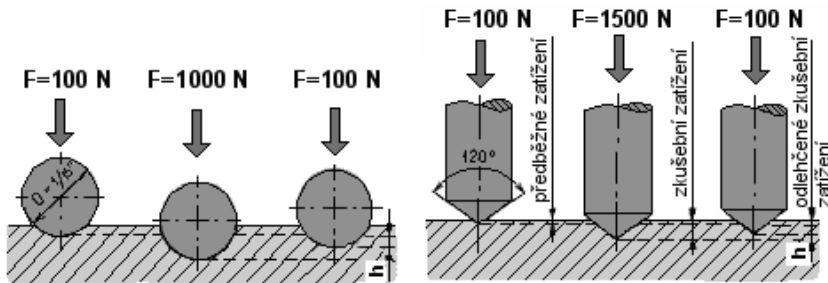
Mechanické vlastnosti vybraných materiálů



	Složení	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	R _p [MPa]	R _m [MPa]	ϵ_f [%]	α [1/K]	cena [\$/kg]	Aplikace
Konstrukční ocel AISI 1020	0.2%C, 0.5%Mn, <0.05%P, <0.05%S	210	7800	295	395	36.5	14*10 ⁻⁶	0.5	nenáročné konstrukční součástky, spojovací materiál, strojírenské součástky
Vysokopevnostní ocel AISI 4340	0.4%C, 0.25%S, 0.7%Mn, 1.85%Ni, 0.8%Cr, 0.25%Mo	210	7800	880	1000	17	14*10 ⁻⁶	2	náročné strojírenské aplikace: těžké převodovky, silně zatěžované hřídele, letecké podvozky
Niklová superslitina 2800	18%Ni, 15%Co, 7%Mo, 1.1%Ti, <0.03%C	210	8000	2617	2693	6	11*10 ⁻⁶	200	pláště raket, zbraně a součástky pro vojenský průmysl, high-end sportovní vybavení (šerm, hlavice golfových holí), uranové odstředivky
Austenitická nerezová ocel AISI 201	0.0%C, 17%Cr, 7%Mn, 4%Ni	200	7800	310	655	40	17*10 ⁻⁶	3.5	nádobí, přístroje
Dural 7075-T6	90%Al, 6%Zn, 0.2%Cr, 2%Cu, 3%Mg	70	2100	500	570	11	33*10 ⁻⁶	4	konstrukce letadel, lodí, automobilový průmysl, sportovní vybavení pro cyklistiku a horolezectví
Titanová slitina T-9047	92%Ti, 5%Al, 3%Sn	100	4500	792	826	10	9*10 ⁻⁶	40	žárupevné a korozně odolné aplikace: letectví a kosmonautika, vojenský průmysl, exkluzivní sportovní vybavení (hlavy válců Porsche & Ferrari)
Mosaz	70%Cu, 30%Zn	130	8400	75	325	70	20*10 ⁻⁶	5	vodovodní fitinky, součástky pro snadné obrábění
Beton		48	2500	-	35 (tlak) 3 (tah)	0.0	11*10 ⁻⁶	0.05	stavební průmysl
Sklo		65	2500	-	35	0.0	8.8*10 ⁻⁶		stavební, optický a potravinářský průmysl
Kost kompaktní		14	2000	100	100	9	20*10 ⁻⁶		
Para-aramid (kevlar)			1400		3620		9*10 ⁻⁶		neprůstřelné vesty a obrněná vozidla, vysokopevnostní lana, brzdové obložení, sportovní vybavení (padáky, tenisové rakety), kompozity – listy větrných elektráren

Tvrдость

Tvrдость .. odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Měří se vlačováním vhodného indentoru do povrchu a následném měření velikosti vtisku

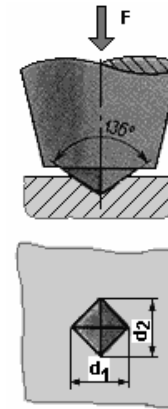


Zkouška tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC)

- HRA – diamantový kužel při 600N (pro slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy)
- HRB – ocelová kulička (pro měkčí kovy)
- HRC – diamantový kužel při 1500N



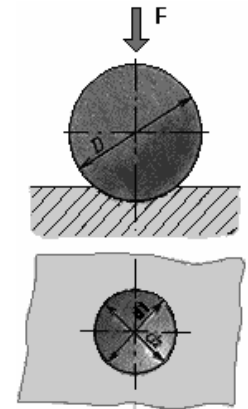
© Hochschule Karlsruhe



Zkouška tvrdosti podle Vickerse

$$HV = 0.189 \frac{F}{d_2}$$

diamantový jehlan
 (ČSN 42 0374)



Zkouška tvrdosti podle Brinella

$$HB = 0.102 \frac{F}{A}$$

ocelová kalená kulička
 (ČSN 42 0371)

Houževnatost a křehkost

Křehký materiál – lom bez významné plastické deformace, absorbuje málo energie.
Skla, keramika, kovy při nízkých teplotách

Houževnatý materiál – významná plastická deformace, před lomem absorbuje energii.
Kovy při teplotách nad teplotou křehnutí (bcc)



houževnatý lom



křehký lom



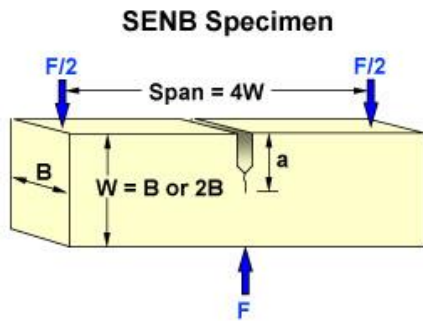
Katastrofický případ křehkého lomu - loď řady Liberty

Tvrdost a houževnatost jsou na materiál většinou protichůdné požadavky. Možné řešení – povrchové úpravy (nitridace, cementace, povrchové kalení, povrchové vrstvy) – houževnaté jádro, tvrdý povrch

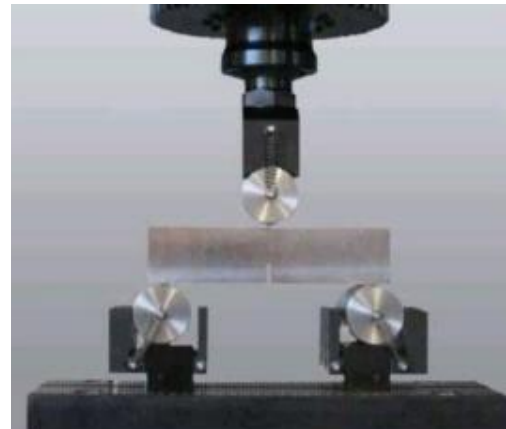
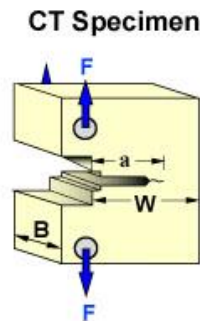
Zkoušení lomové houževnatosti

Zkušební tělesa a zařízení

- SENB (single edge notched beam) – tříbodový ohyb
- CT (compact tension) – excentrický tah
- Charpyho kladivo – dynamická zkouška, odečet energie



www.totalmateria.com



© Hochschule Karlsruhe



Výroba a zpracování kovových materiálů

- Odlévání
- Tváření
- Prášková metalurgie
- Obrábění
- Spojování (nýtování, svařování, pájení, lepení)
- Tepelně-mechanické zpracování
- Povrchové úpravy (pískování a otryskávání, chemické povrchové úpravy, nátěry, galvanické a žárové pokovování, povlakování, plazmové nástřiky, cementace, nitridace)



Kontinuální odlévání oceli



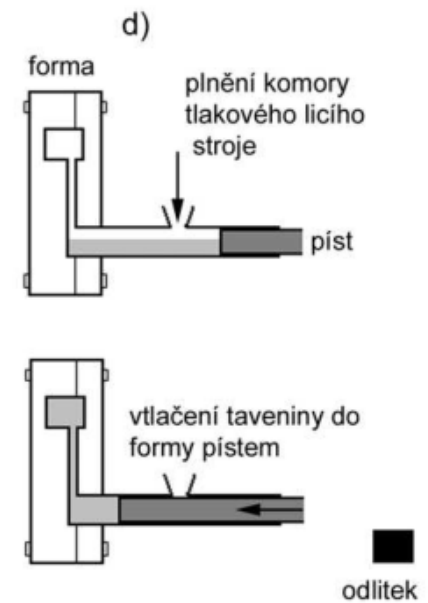
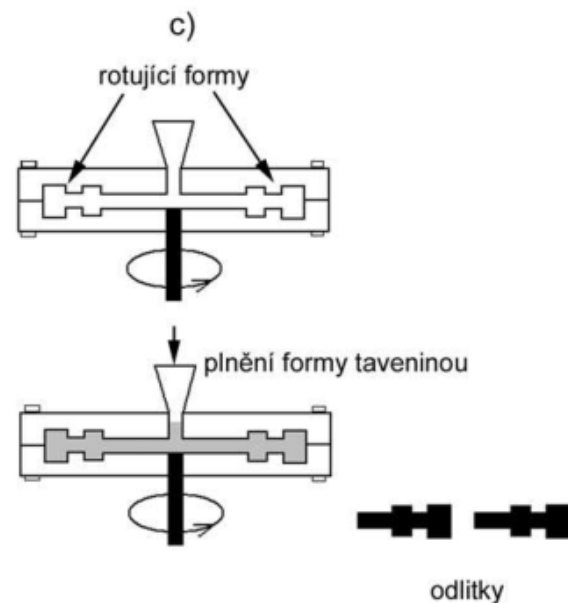
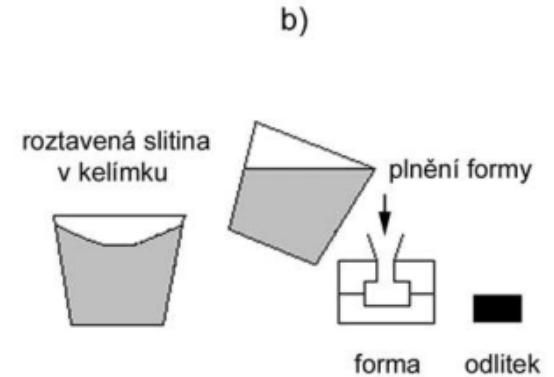
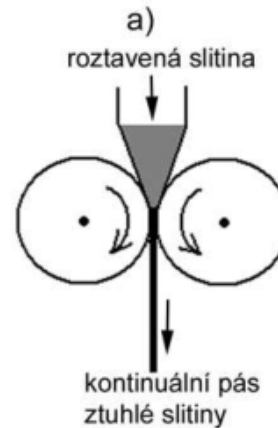
Svařování obloukem



Soustružení

Odlévání (1)

- Přerušované lití – ingoty (pískové nebo kovové formy – kokily) (b,c,d)
- Kontinuální lití – pásy, tyče, desky (a)
- Gravitační lití do forem – finální výrobek jednoduchého tvaru (b)
- Odstředivé lití (c)
- Tlakové lití (d)

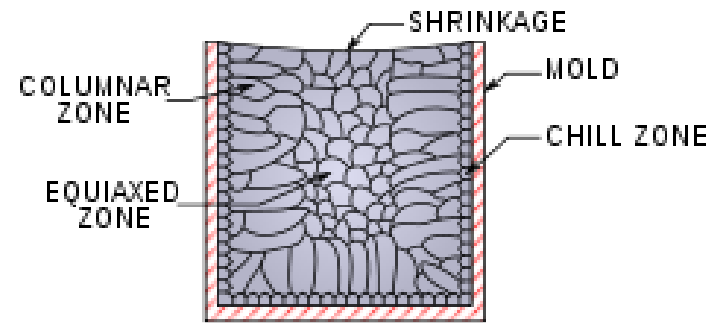


Odlévání (2)

Kov při tuhnutí krystalizuje ze zárodků a zmenšuje objem. Zrna jsou tím menší, čím je větší ochlazovací rychlost a počet zárodků (očkování).

Slévárenské vady

- dutiny (snížení objemu při tuhnutí, rozpuštěné plyny)
- vměstky (cizorodé částice a objekty, produkty oxidace)
- trhliny (u složitých odlitků v důsledku nerovnoměrného chlazení)



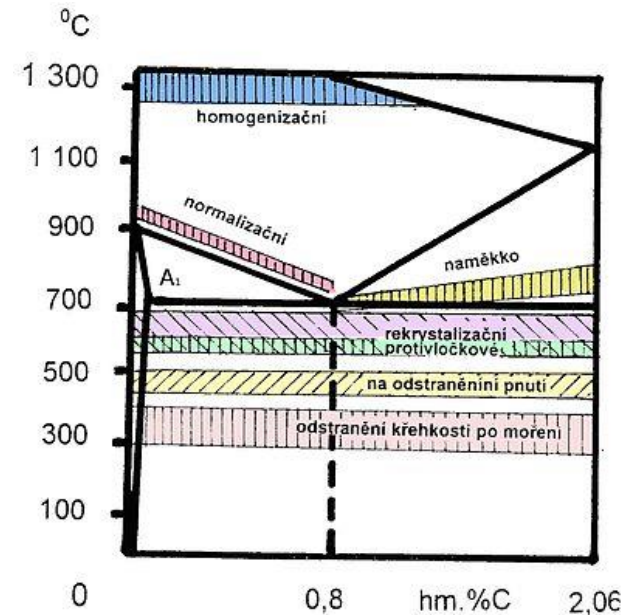
Nejvýznamnější slévárenské slitiny

- litina (Fe + > 2.1% C)
- slitiny Al-Si

Tepelné zpracování

Aplikace tepelného režimu pro dosažení požadovaných vlastností

- žíhání (ohřev – výdrž – pomalé chlazení)
 - odstranění vnitřního pnutí
 - dosažení stejnorodé a hrubší mikrostruktury
 - snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti a tvažitelnosti
- kalení (ohřev – výdrž – prudké ochlazení)
 - pouze u feritických ocelí
 - vznik přesyceného jemnozrnného metastabilního tuhého roztoku uhlíku v železe – martenzitu
 - zvýšení tvrdosti, snížení houževnatosti
- popouštění (ohřev na nižší než kalicí teplotu, výdrž)
 - odstranění vnitřního pnutí po kalení



Schematický přehled teplotních oblastí žíhání ocelí

Tváření

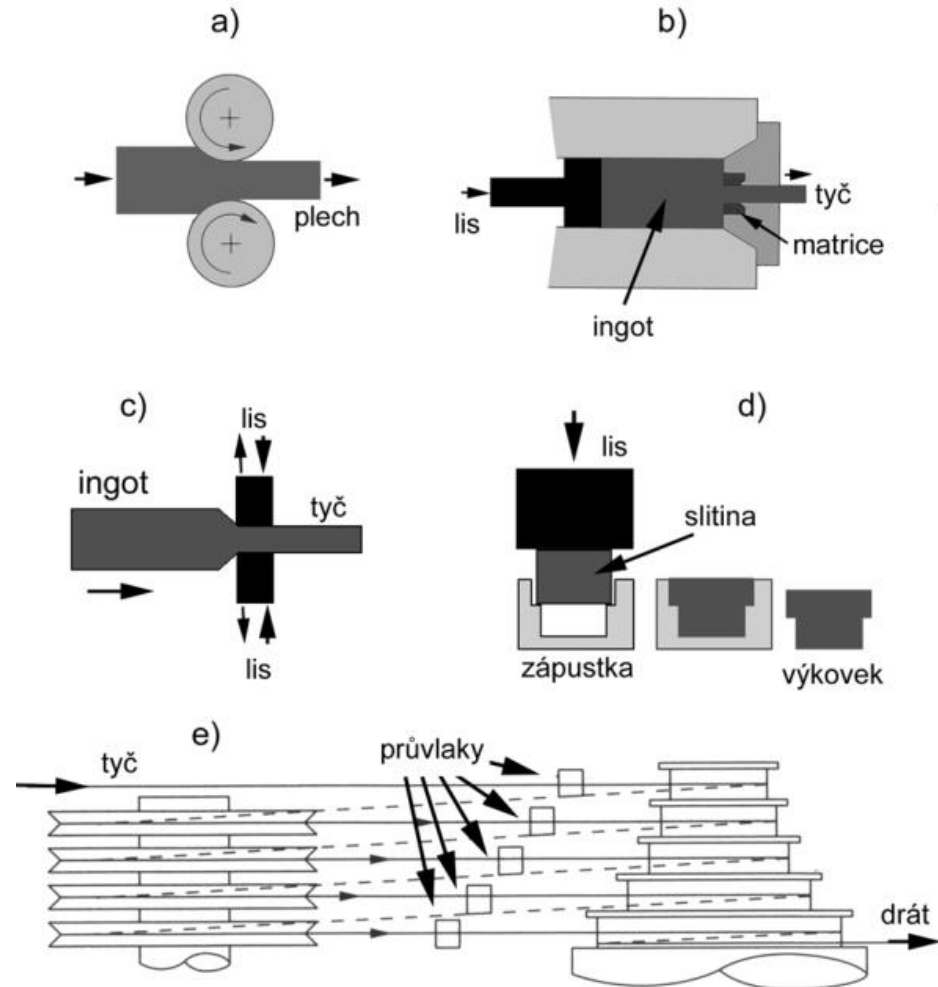
Změna tvaru výrobku v důsledku plastické deformace (bez odběru třísek).

Vznik deformační textury, částečné odstranění slévárenských vad.

Tváření **za studena** (deformační zpevnění) nebo **za tepla** (u ocelí 800-1100°C)

Technologie tváření

- válcování – plechy, tyče, fólie (a)
- protlačování – tyče, trubky, profily (b)
- volné kování (c)
- zápustkové kování (d)
- tažení – dráty (e)

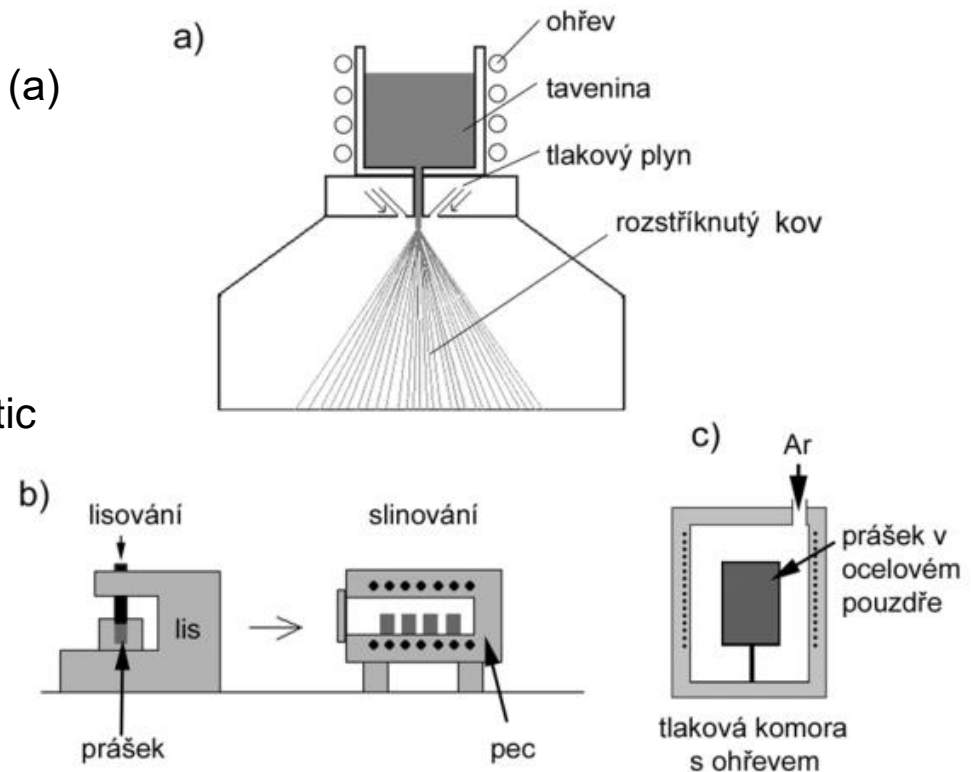


Prášková metalurgie

Zpracování kovů (vč. materiálů s vysokou teplotou tavení, vzájemně neslévatelných) do tvarově složitých a přesných výrobků

Postup

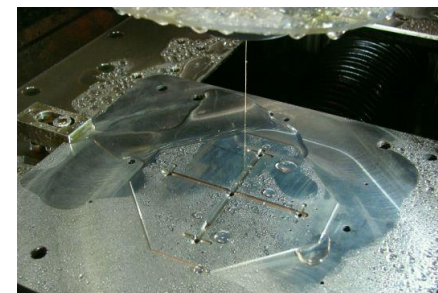
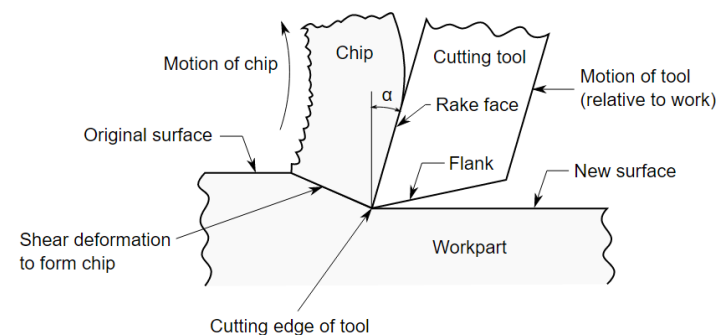
- výroba prášku – rozstříkávání taveniny (a) nebo chemická reakce
- zhutnění lisováním a slinováním (b) nebo izostatické lisování za tepla (hot isostatic pressing, HIP) (c)



Obrábění

Dosažení požadovaného tvaru výrobku a kvality povrchu odebráním materiálu

- soustružení (rotující obrobek, nůž se posouvá po povrchu). Mechanické / CNC
- frézování (rotující fréza, obrobek se posouvá)
- vrtání
- broušení, leštění
- řezání (pásová pila, laser, tlaková voda, drátořez – elektrojiskrové řezání)



Drátořez (elektrojiskrové řezání)



Soustruh



CNC soustruh

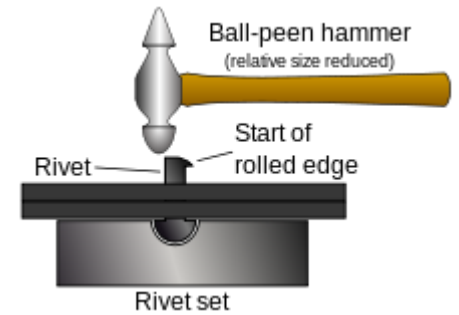


Frézka

Spojování (1)

Nýtování

- nerozebíratelné mechanické spoje
- nýtování za tepla / za studena
- přístup z obou stran / jednostranné nýty



Trhací nýt a nýtvací kleště

Spojování (2)

Šroubové spoje

Lepení

- bez tepelného ovlivnění
- bez vrubů
- nižší pevnost

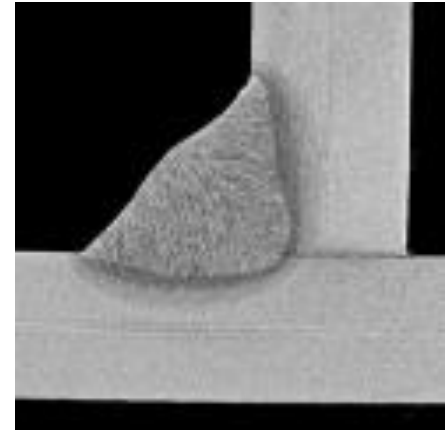
Pájení

- pájka – slitina s nižším bodem tání než spojované součásti. Měkké pájky (Pb, Sn) – do 500°C, tvrdé pájky (mosazné) – nad 500°C
- mechanismus: adheze kovů, difuze (při vyšší teplotě)
- nižší pevnost

Spojování (3)

Svařování

- svařování plamenem (acetylen + kyslík – autogen)
- svařování elektrickým obloukem – tavné / netavné elektrody, ochranná atmosféra (MIG, MAG, TIG)
- odporové svařování – spojované materiály mezi elektrodami
- laserové svařování
- svařování elektronovým paprskem



Silné lokální tepelné ovlivnění materiálu – svár má odlišné mechanické a korozní vlastnosti

Povrchové úpravy (1)

Mechanické úpravy

- pískování, otryskávání – odstranění nečistot
- kuličkování – tlakově předepjatý povrch

Chemické úpravy

- odmašťování (H_2SO_4 , HCl , $NaOH$, CCl_4)
- černění - brunýrování ($NaOH + NaNO_3 + NaNO_2$)
- chromátování (pasivace) hliníku
- fosfátování – podkladová vrstva pro nátěry
- chemické niklování

Elektrochemické úpravy

- galvanické pokovování (předmět jako katoda, rozpouštěná anoda z povlakového kovu) – galvanické zinkování, niklování, chromování
- anodická oxidace – eloxování hliníku (předmět jako anoda) – na povrchu tvrdá a korozně odolná vrstva Al_2O_3

Povrchové úpravy (2)

Tepelné a chemicko-tepelné povrchové úpravy

- žárové pokovení (např. žárové zinkování)
– ponoření do roztaveného kovu, silný kompaktní povrch
- plazmové nástřiky – tvrdé a chemicky odolné povrchové vrstvy
- cementace ocelí (obohacení uhlíkem)
- nitridace ocelí (obohacení dusíkem)



Povlakování ve vakuu

- chemická depozice z plynné fáze (CVD)
- fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)