

Konstrukční materiály

Skupiny, vlastnosti, technologie

Odlišení materiálových skupin je možné s použitím mnoha parametrů

Popisem na úrovni atomární struktury

Dle převažující vazby

kovová = kovy

kovalentní = polymery

iontová + kovalentní = keramika, skla

Složení – přítomné atomy

Dle elektronové struktury

Dle krystalické struktury

14 Bravaisových mřížek

Morfologie a přítomnost fází

Makroskopicky
pozorujeme vlastnosti

Dle aplikačních vlastností

Mechanické vlastnosti

pružnost pevnost plasticita
houževnatost

Magnetické vlastnosti

feromagnety, paramagnety,
diamagnety

Elektrické vlastnosti

Vodiče polovodiče izolanty

Tepelné vlastnosti

Kapacita, roztažnost, vodivost

Optické vlastnosti

vodivost, odrazivost, absorpce

Dle Technologických vlastností

Slévatelnost, obrobitelnost
tvařitelnost, svařitelnost, tepelné
zpracování, povrchové úpravy
práškové technologie,.....

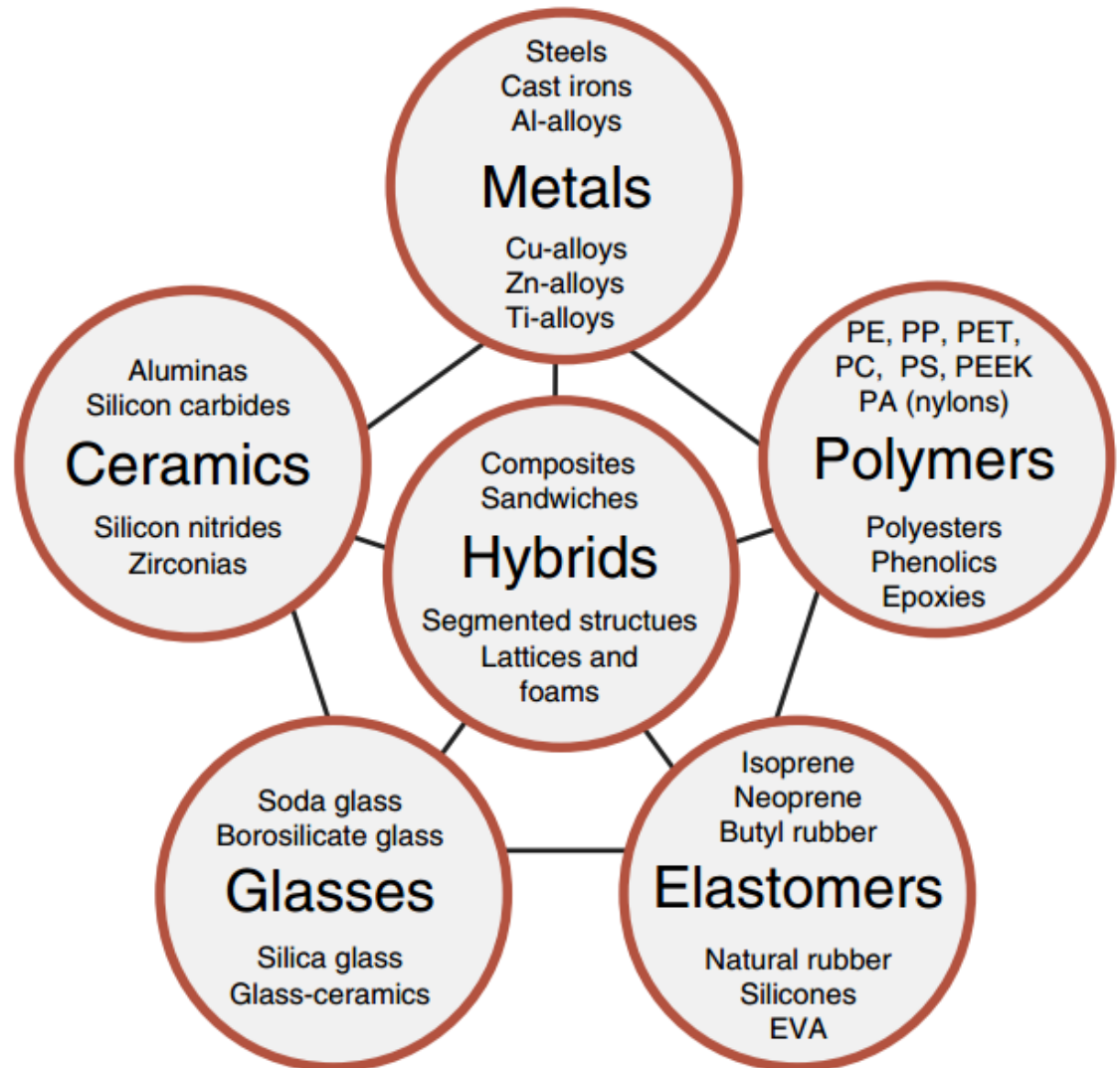
Typické vlastnosti hlavních skupin technických materiálů, dělených dle převažující vazby (a chemického složení)

kovy	keramika, sklo	plasty
<ul style="list-style-type: none">• vysoké E, G• pevné• houževnaté a tvářitelné• zpevnění legováním a plastickou deformací• dobrá tepelná a el. vodivost• vysoká variabilita mechanických vlastností <p>• zpravidla malá korozní odolnost</p>	<ul style="list-style-type: none">• vysoké E, G• tvrdé, křehké• vysoká odolnost proti opotřebení• Elektricky a tepelně nevodivé• zachování vlastností i při vysokých teplotách• dobrá odolnost vůči korozi <p>• značná křehkost</p>	<ul style="list-style-type: none">• nízké E, G• měkké• dobrá tvářitelnost• malé tření• malá měrná hmotnost• dobrá odolnost vůči korozi• variabilita mechanických vlastností <p>• silná teplotní závislost mechanických aj. vlastností</p>

kompozity – kombinace vlastností složek, snaha vybrat si to nejlepší z různých světů, dominantní vliv matrice

Základní skupiny technických materiálů

- Kovy
- Keramiky a skla
- Polymery (+ elastomery)
- Kompozity mohou kombinovat zástupce z kterýchkoli pěti základních skupin



Volba materiálů je v současné době samostatný technický obor

k dispozici je 40 až 80 tisíc značek

Přes existenci expertních systémů na volbu materiálů je nutné mít alespoň základní informace o jednotlivých typech materiálů

Ve strojírenství se standardně hodnotí

mechanické vlastnosti a jejich kombinace (E/ρ , K_{IC} / ρ),
technologie výroby materiálu i dané součásti,
požadovaná životnost,
dostupnost, cena,
ekologická hlediska

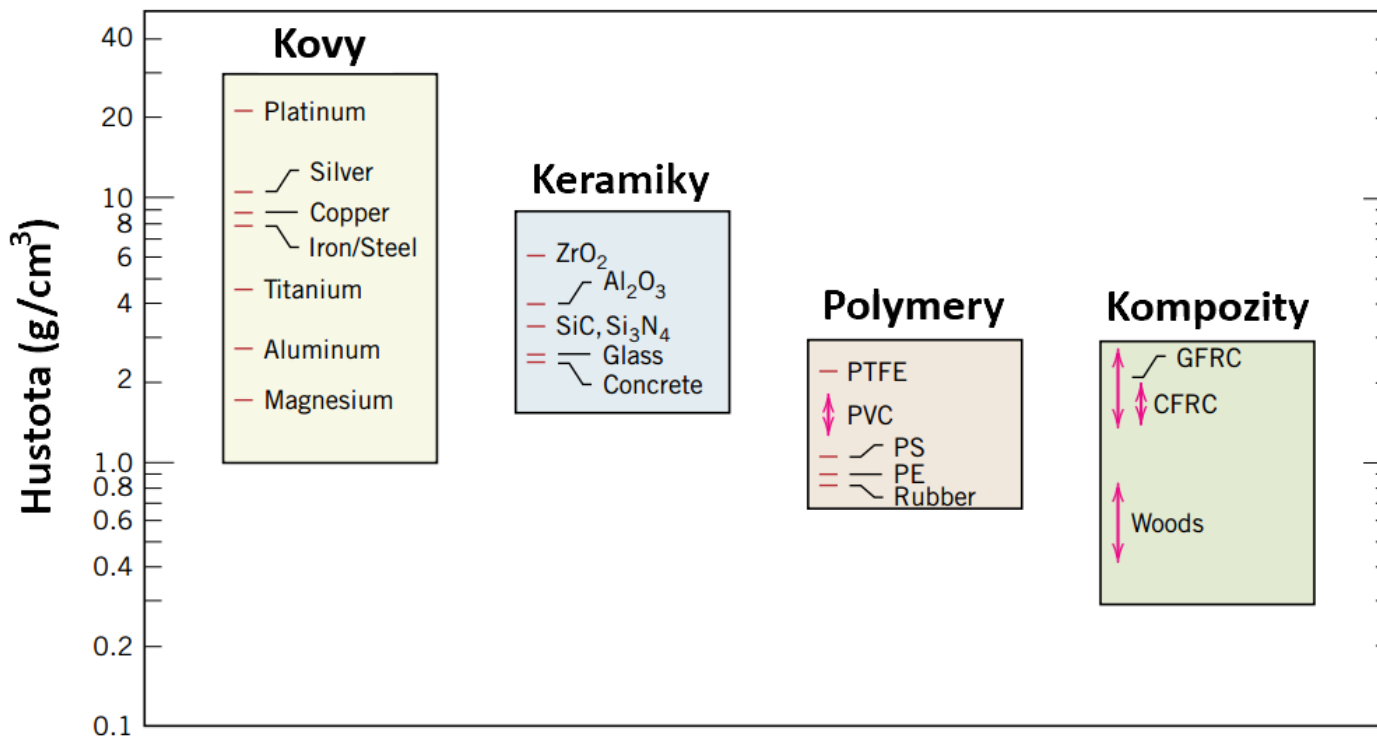
toxická – Hg, As, Pb, Cd, Se, Th - již stopová množství

nepřímé ekologické faktory - energetická náročnost výroby (např. Al)

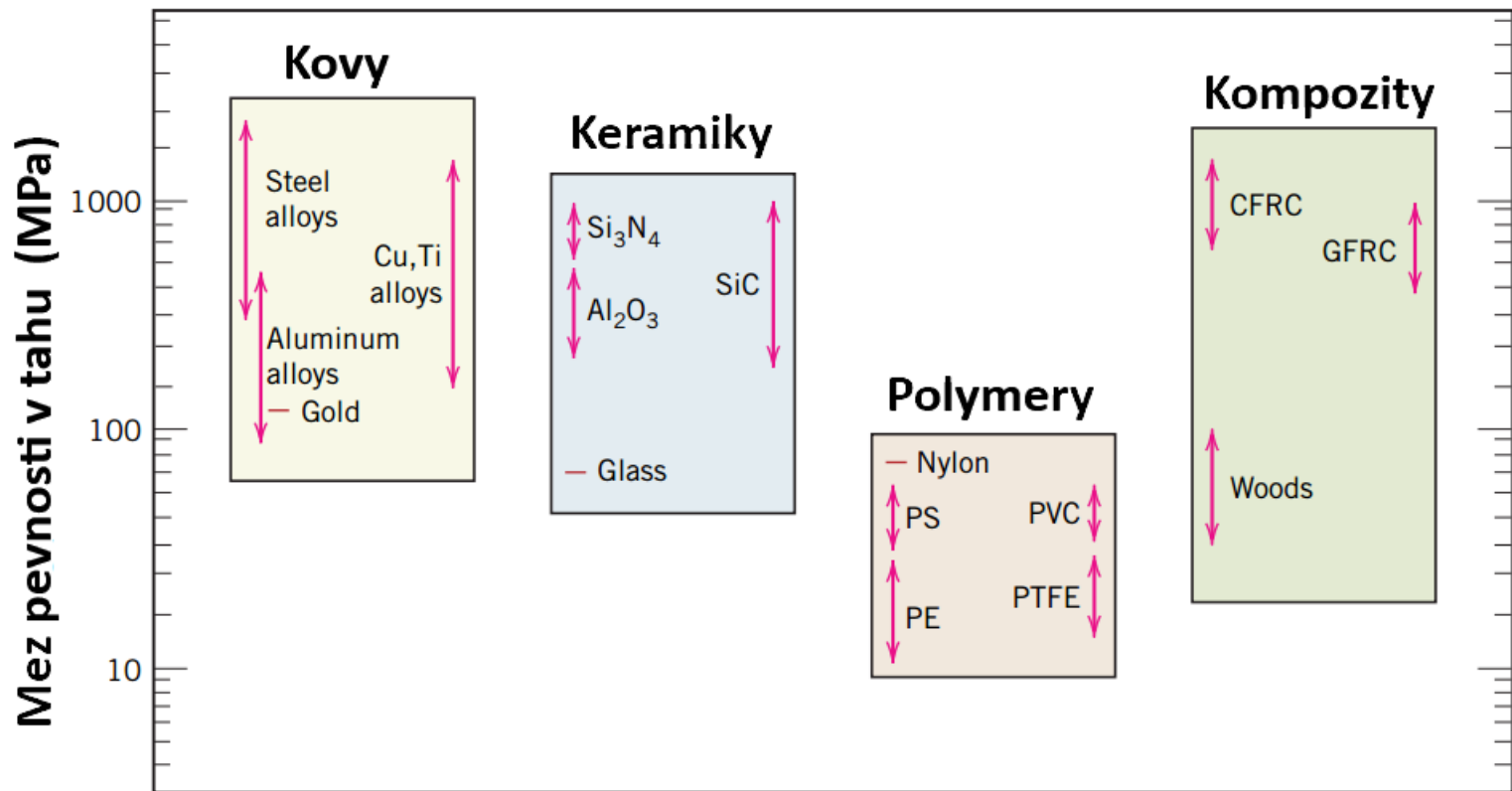
- bezpečnost a spolehlivost konstrukcí
(tankery, reaktory, ..)

- recyklovatelnost

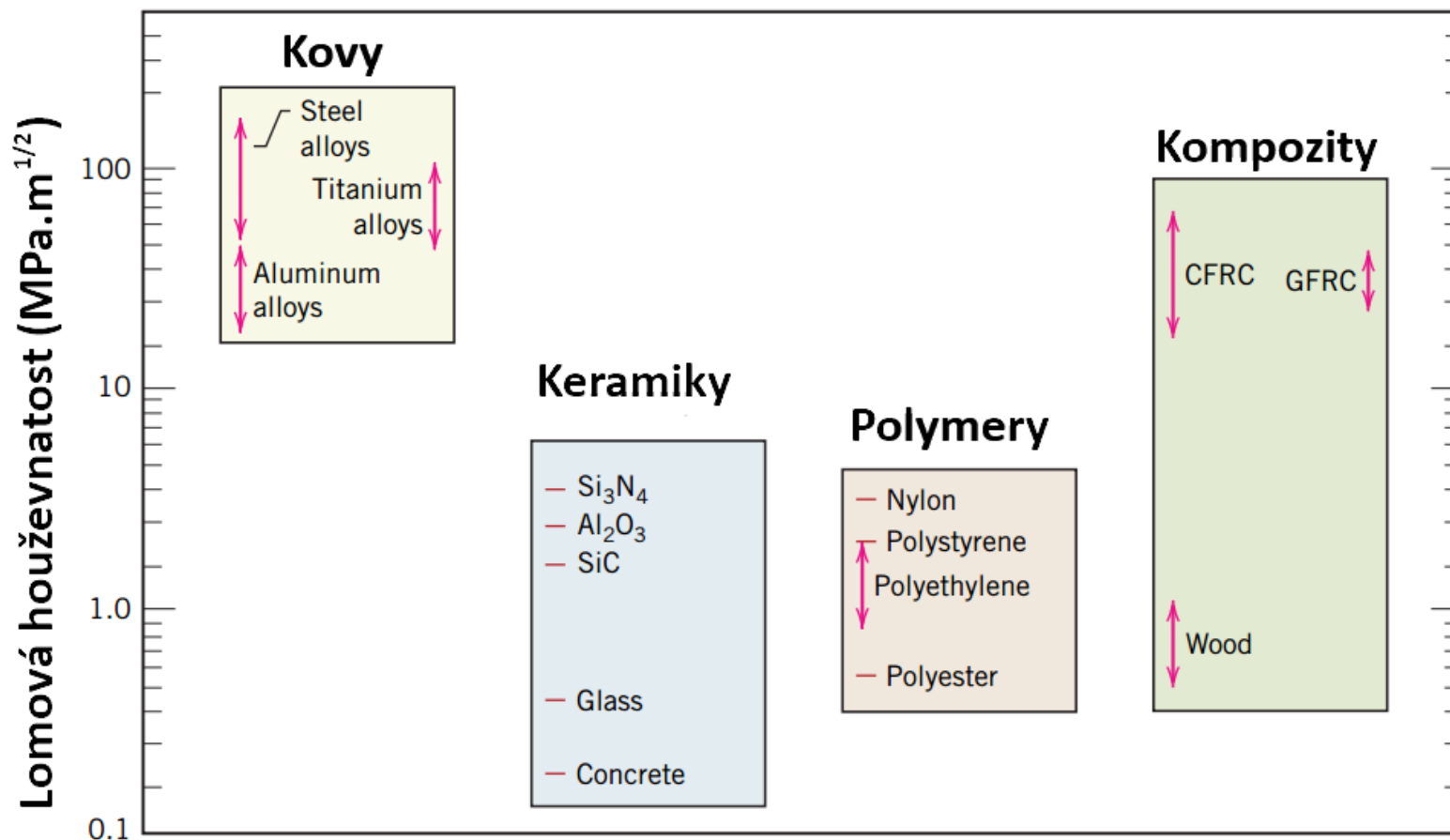
Srovnání hodnot hustoty materiálových skupin



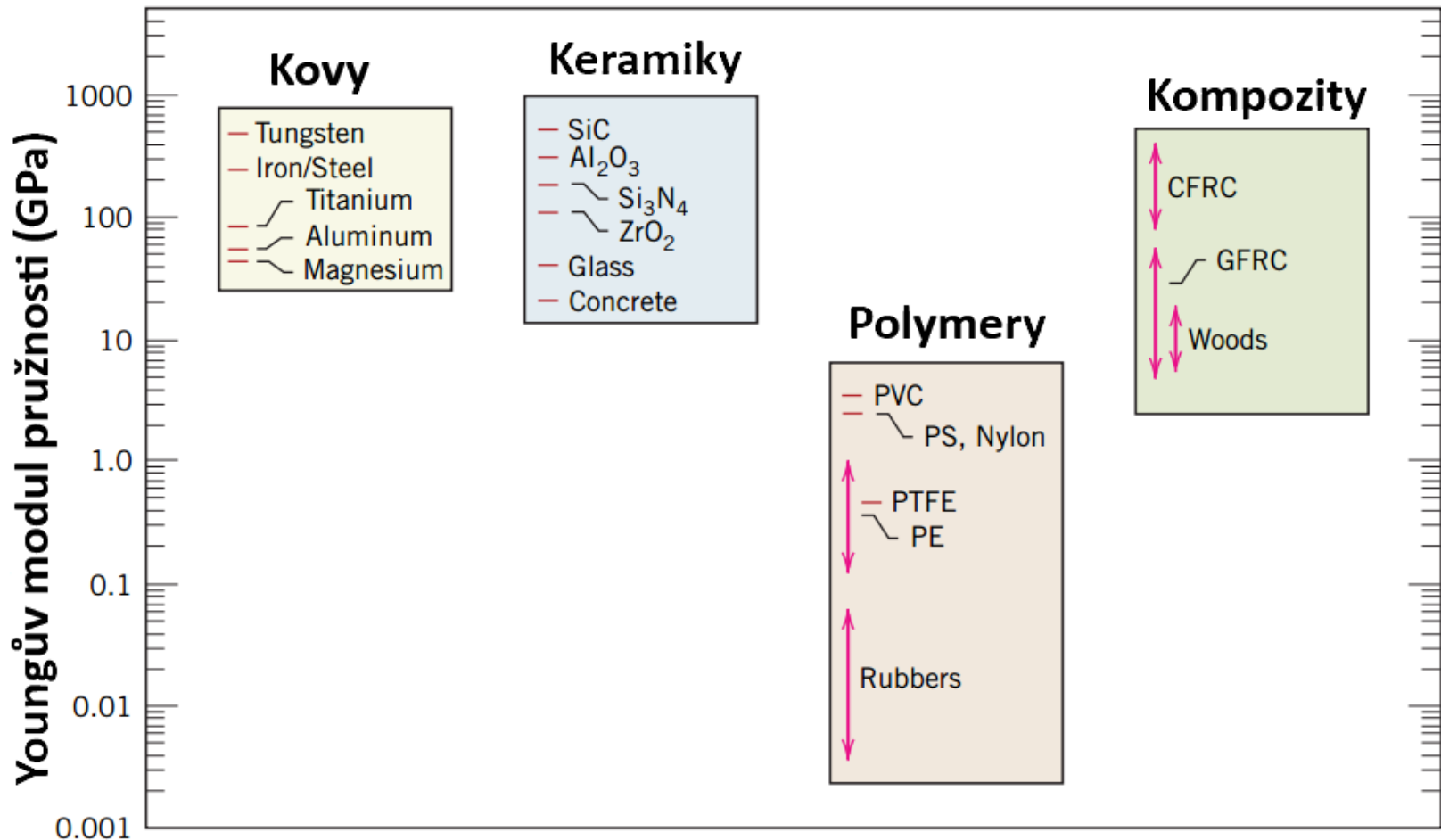
Srovnání rozsahu pevnosti materiálových skupin



Srovnání rozsahu lomové houževnatosti materiálových skupin



Srovnání modulů pružnosti materiálových skupin



Kovy, jejich fyzikální a technické vlastnosti

- Kovová vazba
 - Elektrická vodivost
 - Optická odrazivost
- Jednodušší mřížky s vysokou symetrií
 - Relativně snadná plastická deformace
- Velký rozsah pevností vazeb
 - Velký rozsah teplot tání
 - Velký rozsah modulů pružnosti
- Některé vykazují polymorfii
 - Možnost tepelného zpracování s překrystalizací
- Schopnost tvořit (omezené) tuhé roztoky ze změnou rozpustnosti
 - Možnost tvorby precipitátů
- Vyšší hustoty
 - Ne vždy dobrý poměr pevnost/hmotnost
- Typicky polykrystaly
 - Ovlivnění vlastností mikrostrukturou
- Mnoho mechanismů zpevnění (roztokem, deformační, precipitační, transformační)
- Variabilita mechanických vlastností
 - Způsobená společným působením všeho

Výroba kovů

- Vyrábí se z rud- často oxidy nebo sulfidy kovů
- Kovové atomy je nutno z těchto sloučenin redukovat
(Fe ve vysoké peci redukce CO, hliník redukován elektrolyticky, titan redukován z chloridu hořčíkem)
- Typické procesy pro výrobu polotovarů i konečných výrobků z kovů je odlévání s možností následných tvářecích a obráběcích operací.
- Kovy je také možno mnoha způsoby svařovat, spojovat tepelně a povrchově zpracovávat

Aplikace kovů

- Extrémně široké, vzhledem ke škále vlastností
- Od plastických, měkkých, nízkotavitelných (18°C) po tvrdé, křehké a vysokotavitelné (3000°C)
- Často aplikace stojí na kombinaci pevnosti a houževnatosti
- Vlastnosti je možné plynule upravovat změnou chemického složení a tepelným zpracováním

Dělení kovů

1. Materiály na bázi železa (oceli , litiny)
využívají polymorfie železa

2. Vše ostatní: barevné (neželezné) kovy a slitiny
široká škála, jen některé polymorfní

Další dělení neželezných zpravidla používá:

- kovy s nízkou teplotou tání (Sn, Bi, Li, Cd, Pb, ..)
- lehké kovy (**Al**, **Mg**, Be, **Ti**, ..)
- kovy se střední teplotou tání (Mn, Co, **Ni**, **Cu**, ..)
- ušlechtilé kovy (Pt, Ru, Rh, Pd, Au, Ag, ..)
- kovy s vysokou teplotou tání (V, Nb, Mo, Ti, W, ...)

Železo

Železo ₂₆ Fe

$T_m = 1539^\circ\text{C}$

$\rho = 7\,870\text{ kg/m}^3$

- **polymorfní kov**, modifikace α , β BCC , γ FCC , δ BCC
- **feromagnetické** do Curieho bodu ($\alpha \rightarrow \beta$, 760°C), dále je Fe paramagnetické
- dobrá tepelná i elektrická vodivost
- **měkké, tvárné, malá pevnost**
- užití v elektrotechnice (relé, jádra elektromagnetů, měřicí přístroje)
- **zásadní vliv C na vlastnosti Fe**

Slitiny Fe-C

Ocel - slitina Fe a C s max. koncentrací C 2,1 hm.%

Materiál je možno plně převést ohřevem na austenit, oceli se dají tvářet alespoň za tepla

Litina - slitina Fe a C s koncentrací C nad 2,1 hm.%

Vyazuje vždy eutektickou reakci, jejím produktem je Ledeburit, nelze tvářet ani za vysoké teploty

Kromě uhlíku mohou obsahovat další prvky = „**příměsi**“,

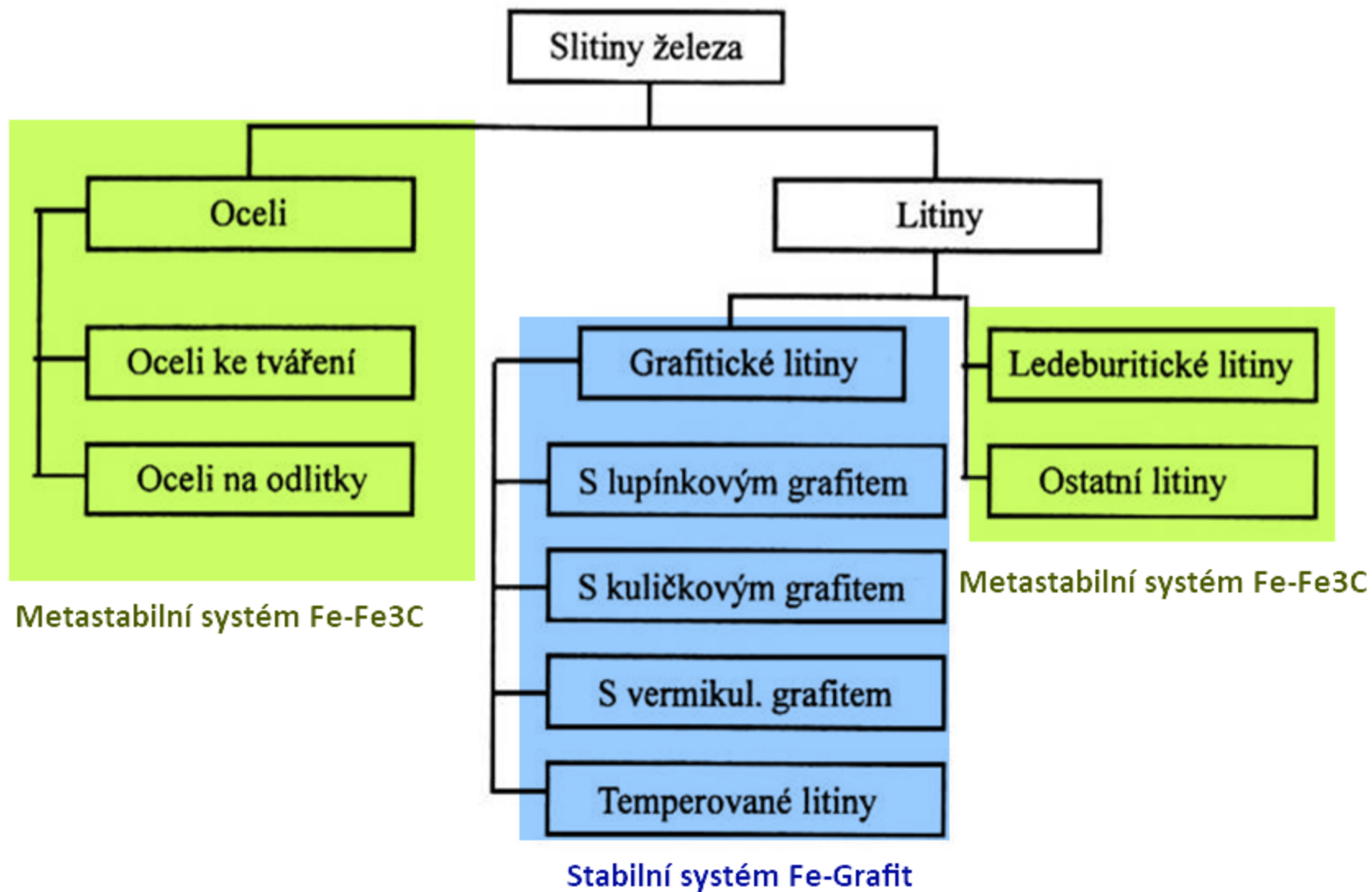
ty dělíme na **doprovodné prvky** (pocházejí z výrobního procesu) a

přísady (legující prvky, přidávají se úmyslně)

podle obsahu legujících prvků s oceli dělí podle ČSN EN 10020 do dvou skupin:

- oceli nelegované
- oceli legované

(minimální mezní obsahy jednotlivých prvků jsou vymezeny (např. Mn=1,65; Si=0,50, ...B=0,0008))



Dělení ocelí

ČSN EN 10020 oceli dělí podle jakosti (kvality metalurgického zpracování) do těchto skupin:

- oceli nelegované
 - oceli obvyklých jakostí
 - nelegované jakostní oceli
 - nelegované ušlechtilé oceli
- oceli legované
 - legované jakostní ocel
 - legované ušlechtilé oceli

ČSN používá pojem třída ocelí (11 – 19) a hlavním kritériem je chemické složení

Novější značení EU – dle použití (konstrukční oceli, oceli na tlakové nádoby, ..)

- dle chemického složení

- číselné označení (převzato z DIN, např. 1.4301..)

Výroba oceli

Kovové železo je redukováno z rud ve vysoké peci.

Výsledkem je surové železo s vysokým obsahem nečistot a také uhlíku



Ocel vznikne, když ze surového železa odstraníme nežádoucí příměsi (P,S,N,H a přebytečný C) a ocel dle konkrétní značky nalegujeme

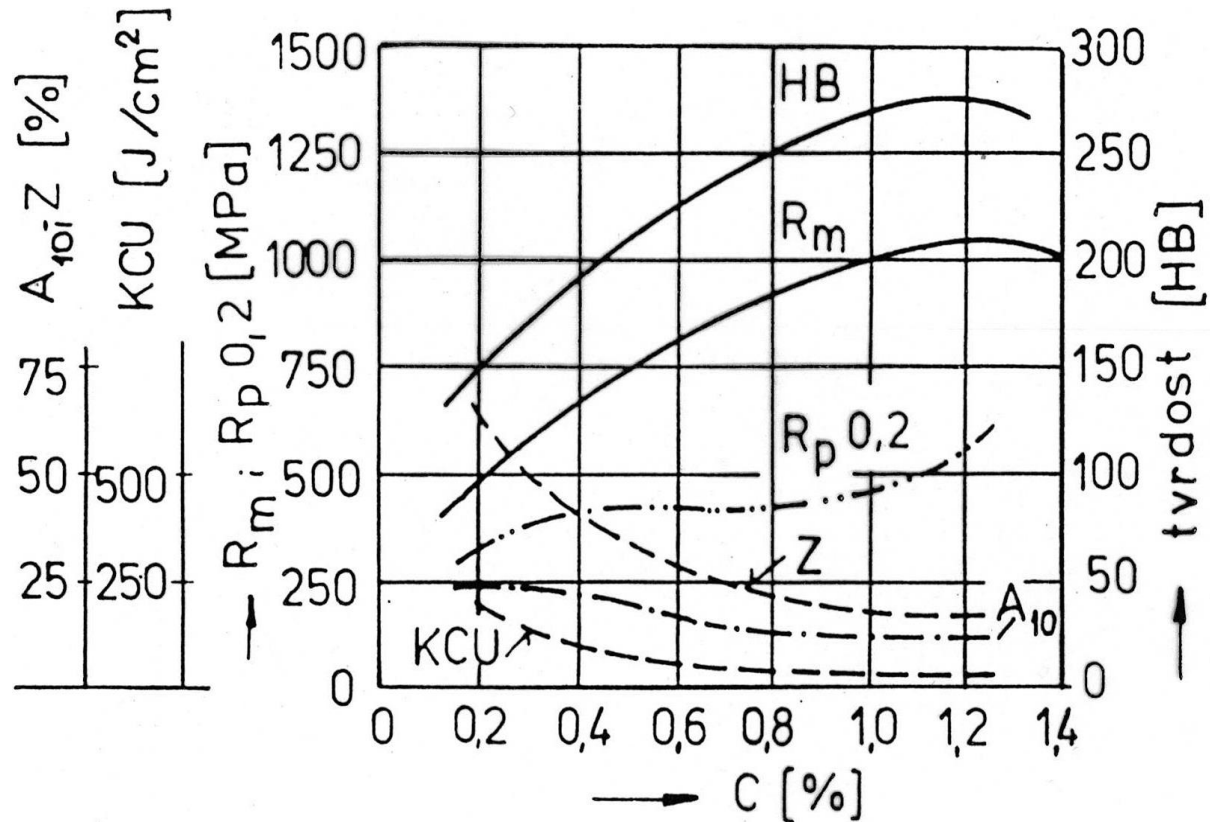
Nečistoty se odstraňují v **údobí oxidace**- všechny prvky, které mají vyšší afinitu ke kyslíku než Fe postupně hoří (*vhánění kyslíku, přidávání rudy nebo šrotu*)

Následuje **údobí dezoxidace** - odstranění kyslíku (*pomocí Si, Al, Ca, oxidy vyplavou do strusky*)

Uhlíkové oceli

Nejrozšířenějšími oceli jsou jednoduché **uhlíkové oceli v normalizovaném stavu** (struktura tvořená feritem a perlitem)

I tento “jednoduchý” materiál vykazuje velkou variabilitu vlastností podle obsahu uhlíku, a to jsme ještě ani nezmínili možnosti tepelného zpracování na speciální struktury



Vlastnosti ocelí

- **variabilita mechanických vlastností** ve vazbě na strukturní stav
- R_m až 3000MPa, tažnost až desítky %, KV až 300 J
- K_{IC} i přes 100 MPa.m^{1/2} (ale pozor začíná se téměř od „nuly“)
- závislost mech. vlastností na teplotě,
 - pokud matrice má BCC krystalovou strukturu dochází ke křehnutí v nízkých teplotách
- **hlavní konstrukční materiál strojírenského průmyslu, zásadní i pro stavby**
- (oceli konstrukční, pružinové, cementační, nitridační, žárovevné a žárovzdorné, nerezavějící, pro práci za nízkých teplot,...)

Ocelemi a jejich tepelným zpracováním se bude intenzivně zabývat předmět 3SV v dalším semestru

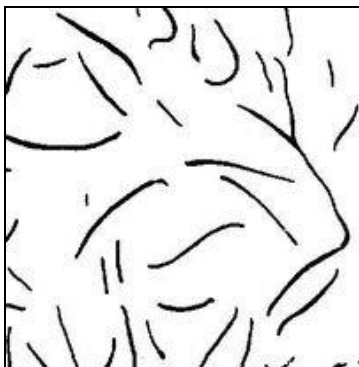
litiny

- Jsou to slitiny železa, uhlíku a příměsí, kde obsah uhlíku je nad 2, hm.%, když součet příměsí nepřesáhne 2%.
- určené výhradně na výrobu odlitků
- jedna z nejdůležitějších skupin kovových materiálů, ačkoliv vývoj je minimální, užití litin je široké
- Zásadní je, jakou formou se vyloučil uhlík, ten nalezneme jako:
 - **grafit** – je měkký, napomáhá obráběcímu procesu, podle svého tvaru litinu mechanicky oslabuje méně nebo více
 - Ve sloučenině **ledeburitického cementitu**, který přináší vysokou tvrdost a minimální opracovatelnost odlitku
- (viz. studijní opora)

Tvar grafitu grafitických litin

odvozené podle vzhledu grafitových částic na metalografickém výbrusu, tj. podle vzhledu náhodných rovinných řezů grafitickými částicemi. Je potřeba si uvědomit, že grafit je prostorový útvar.

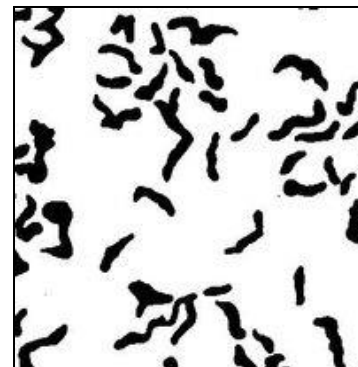
Škodí nejvíce,
Ostré konce =
koncentrátory
napětí



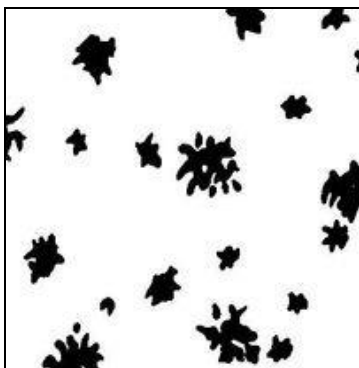
lupínkový (I)



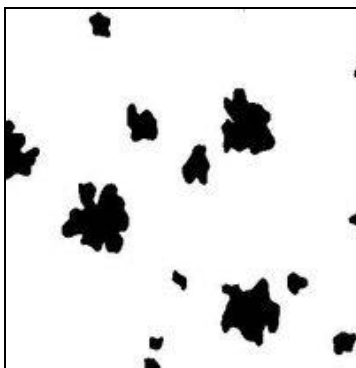
vločkový (II)



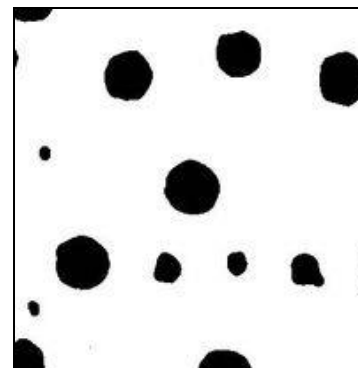
červíkovitý (III)



pavoučkovitý (IV)



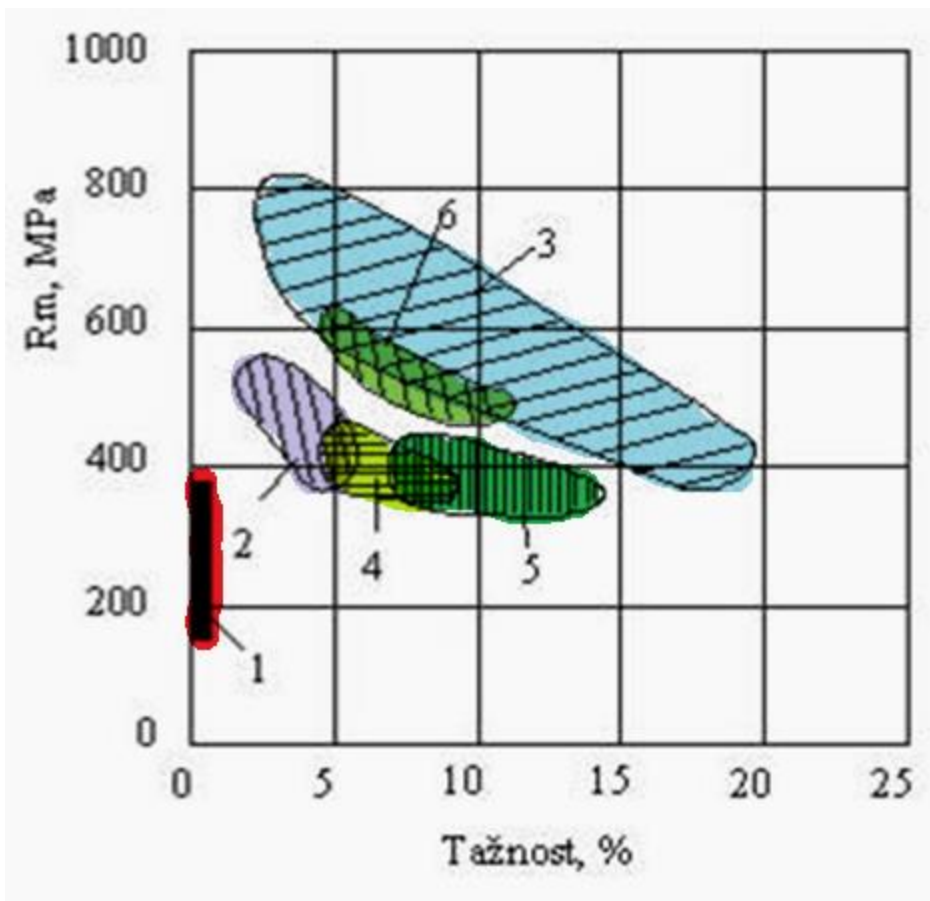
nedokonale zrnitý (V)



zrnitý (VI)

Téměř žádný
vrubový účinek,
neoslazuje
materiál

Vliv tvaru grafitu na mechanické vlastosti



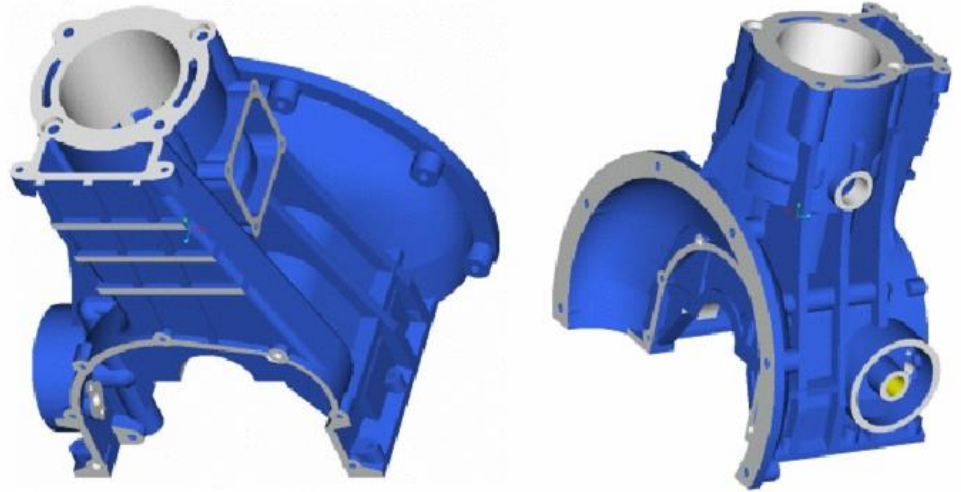
1. **litina s lupínkovým grafitem**
2. **litina s červíkovitým grafitem**
3. **litina s kuličkovým grafitem**
- vločkový grafit:**
 4. temperovaná litina s bílým lomem
 5. temperovaná litina s černým lomem
 6. temperovaná perlitická litina

Použití grafitických litin



Blok motoru a kliková skříň jsou ze slitiny hliníku a válce z litiny.

... a také celá hlava válců, která je namísto z hliníku vyrobena z LKG.



Kliková skříň a válec tvoří jeden celek (monolit), který je odlit z LKG.



Neželezné kovy

- Podstatně menší produkce než ocelí a litin

cca jen 5% hmotnosti ročně vyrobených kovových materiálů jsou neželezné materiály

V roce 1995 v milionech tun: ocel 750, Al a slitiny 18, Ni a slitiny 0,7, Ti houba 0,09

- Podstatně vyšší cena

Přednosti ve srovnání s ocelmi

- ve většině případů nespočívají v absolutních hodnotách mechanických vlastností,
- Výhody jsou v relativních hodnotách , např. $(E/\rho, K_{IC}/\rho, R_m/\rho)$
- často lepší korozní odolnost
- tepelná a el. vodivost (od výborné vodivosti až po odporové slitiny)
- rozmanité fyzikální vlastnosti (magnetismus, termoelektrické napětí)

hliník

Hliník $_{13}\text{Al}$ $T_m = 660,1^\circ\text{C}$ $\rho = 2\,700\text{kg/m}^3$

- **nepolymorfní kov**, FCC krystalová struktura,
 - výborná tepelná i elektrická vodivost; nemagnetický
 - **měkký, tvárný, malá pevnost**,
 - mechanické vlastnosti hliníku jsou poměrně nízké (v měkkém stavu $R_m = 60\text{ MPa}$, $A = 25\%$)
 - rekrytalizační teplota je výrazně ovlivněna čistotou, technický Al má čistotu 99,3 – 99,8 %.
-
- Al je nejrozšířenější kov v zemské kůře a spotřebou druhý nejvýznamnější po Fe,

Vlastnosti hliníku

Korozní odolnost

Hliník je na vzduchu stálý, pasivuje. Tvoří se **ochranná vrstvička Al_2O_3** . Odolává dobře mořské vodě, neutrálním nebo oxidačním roztokům solí a koncentrované kyselině dusičné. Částečně se rozpouští v kyselině sírové a neodolává silnějším zásadám.

Použití Al - kde nevadí nízká pevnost a lze využít dobré elektrické i tepelné vodivosti, nízké měrné hmotnosti, značné odolnosti proti korozi, dobré odrazivosti světelných paprsků.

Vyrábí se řada polotovarů – zvláštní význam fólie o tloušťce pod 0,1 mm.

- ***strojírenství*** (odlitky, konstrukční součástky, různé profily, atd.)
- ***stavebnictví*** (fasádní profily, profily pro výrobu dveří a oken)
- ***potravinářský průmysl*** (obalový materiál- alobal)
- ***elektrotechnika*** (kabely, dráty)
- ***letecký průmysl*** (slitiny na bázi Al-Li,...)

Slitiny hliníku

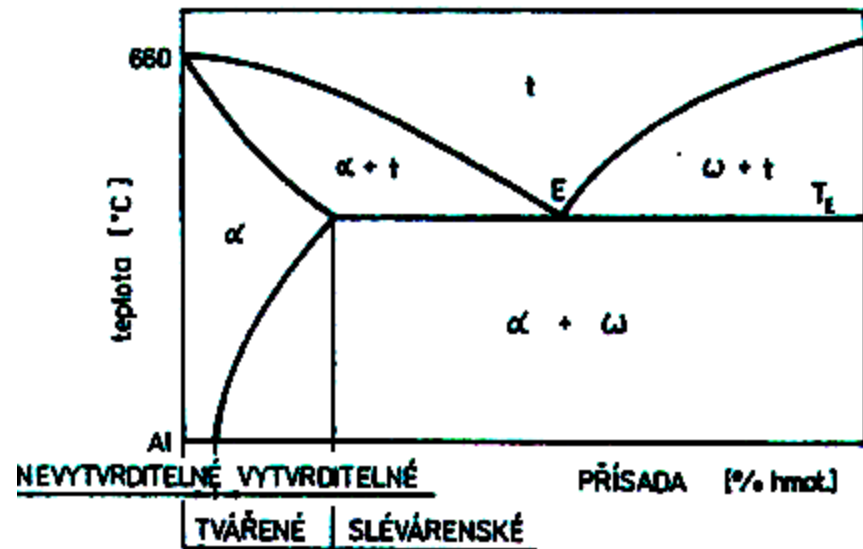
- většina binárních diagramů **Al-X** ($X = \text{Cu, Si, Mn, Mg, Zn, ...}$) má eutektický charakter a má na straně Al změnu rozpustnosti
- Je tedy možné očekávat precipitaci využitelnou pro zpevnění (precipitační vytvrzování v přednášce č. 6)
- Pozice slitiny v diagramu určuje i obecné dělení slitin Al:

- **tvářené** (existence homogenního tuhého roztoku)

- **slévarenské** (mají netvářitelné eutektikum)

- **vytvrditelné** (tuhý roztok podléhá změně rozpustnosti, dochází k precipitaci)

- **Nevytvrditelné** (Tuhý roztok neprochází změnou rozpustnosti)



SLITINY HLINÍKU

Slévárenské slitiny
- hlavně slitiny Al-Si (siluminy)
- Al-Si-Mg, Al-Si-Cu
- Al-Si-Cu-Ni, Al-Cu, Al-Mg.

podeutektické
4,5 - 10 % Si

eutektické
10 - 13 % Si

nadeutektické
nad 13 % Si

Slitiny určené k tváření

vytvrditelné

nevytvrditelné

Al-Cu-Mg

Al-Mg-Si

Al-Zn-Mg

Al-Zn-Mg-Cu

Al-Mg

Al-Mn

Vybrané slitiny hliníku

Slévárenské slitiny

slitiny typu *Al-Si* - **siluminy** patří k nejvýznamnějším slitinám. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají siluminy s eutektickým složením (cca 12 % Si). Jsou dobře odolné proti korozi, avšak pro tvarově složité odlitky se používají zřídka. Většinou se používají pevnější siluminy speciální. Největší vliv na zvýšení pevnosti mají přísady Mg a Cu. Tyto slitiny lze vytvrzovat.

Tvářené slitiny

Mají obsah legujících prvků obvykle v rozsahu tuhého roztoku, většina slitin je tedy poměrně málo legována, obsah legujících prvků zpravidla nepřekročí 10%.
Příklady:

- ✓ **Slitiny *Al-Cu-Mg*** – „*duraly*“ dosahují vysoké pevnosti po vytvrzení, jejich předností je přirozené stárnutí, nevýhodou je malá odolnost proti korozi.
Ni - ve slitinách zvyšuje pevnost, zejména i za zvýšených teplot, obsah bývá 1 až 2 % v kombinaci s *Cu*, popř. *Mg*, tvoří slitiny používané na výkovky pracující za tepla
- ✓ **Slitiny *Al-Zn-Mg-Cu*** – nejpevnější slitiny hliníku, mají velmi dobré mechanické vlastnosti i ve svařích a dobrou stálost na vzduchu, nedostatkem je sklon ke korozi pod napětím, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost než u duralů. (slitina $AlZn6Mg2Cu$ má po TZ R_m až 580 MPa).

hořčík

Hořčík ₁₂ Mg $T_m = 650^\circ\text{C}$ $\rho = 1\,740\text{ kg/m}^3$

- **nepolymorfní kov**, HCP krystalová struktura
- horší tepelná i elektrická vodivost
- Paramagnetický
- za studena **málo tvárný**, nízké hodnoty houževnatosti, anizotropie mechanických vlastností
- malá korozní odolnost
- užití - čistý Mg jako redukční činidlo při výrobě Ti a pro modifikaci litiny s kuličkovým grafitem
- zejména při vyšších teplotách je velmi reaktivní a jeho výroba a zpracování jsou obtížné

Slitiny hořčíku

- **Přednosti:** nízká měrná hmotnost ($1,7$ až $1,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), měrná pevnost srovnatelná se slitinami hliníku, velmi dobrá obrobitelnost, vysoký útlum vibrací
- **Nevýhody:** nízká tvárnost, sklon k elektrokorozí v kontaktu s většinou kovů a slitin, obtížnější svařitelnost než Al slitiny
- **Mg-Al-Zn:** nejvíce používané slitiny hořčíku, známé jako *elektrony*. Hlavní zpevňující účinek má Al, tloušťka stěny odlitku je min. 3 – 4 mm, max. teplota pro dlouhodobější použití 150°C .
- **Mg-Zn-Zr :** vyšší mech. vlastnosti (Zn zpevňuje, Zr zjemňuje zrno, množství 0,4 až 1 %)
- Rozvoj Mg slitin se orientuje na zvyšování korozní odolnosti, teplotní stability a dobře smáčivých kompozitních matic při vytvrzování SiC a Al_2O_3 .

titan

Titan $_{22}\text{Ti}$ $T_m = 1\,668^\circ\text{C}$ $\rho = 4\,506\text{ kg/m}^3$

polymorfní kov, modifikace α -HCP do teploty 882°C , potom β -BCC

- špatná tepelná i elektrická vodivost
- **Paramagnetický**
- **přednosti Ti** :
 - nízká měrná hmotnost a zároveň vysoká pevnost (měrná pevnost je stejná nebo i vyšší než u ocelí),
 - dobrá vrubová houževnatost i za nízkých teplot,
 - dobrá odolnost proti korozi,
 - vysoká tepelná odolnost,
 - dobrá tvářitelnost i svařitelnost

hlavní nevýhody:

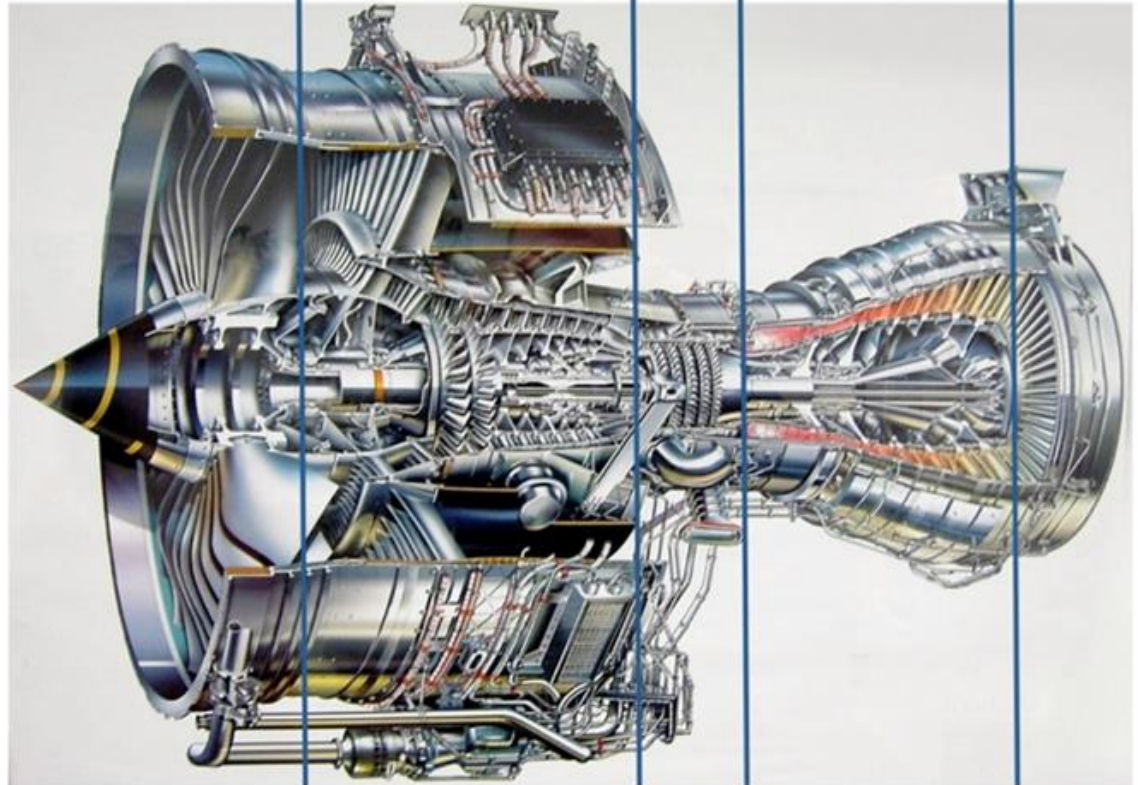
- obtížné zpracování, způsobené hlavně vysokou reaktivitou Ti za teplot nad 700°C , Ti má i horší obrobiteľnosť, (zásadní význam má chlazení), horší slévateľnosť
- nelze zpracovávat vratný odpad ve větším množství,
- špatné třecí vlastnosti.

Použití titanu

- *chemický, papírenský a textilní průmysl* (využívá se zejména odolnost proti Cl a jeho sloučeninám),
- *součásti lodí* (využívá se výborná odolnost proti mořské vodě),
- *zdravotní nezávadnost* Ti dovoluje jeho použití v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v chirurgii (nástroje, šrouby, implantáty),
- nízká měrná hmotnost a zároveň značná pevnost v letectví, raketové technice i v dopravě. Také sportovní potřeby.



	Ti-64	Ti-6246	Ti-834	Ni-based Superalloys	Titanium Aluminides
Operating temperature [°C]	230°C	430°C	730°C	1230-730°C	730°C

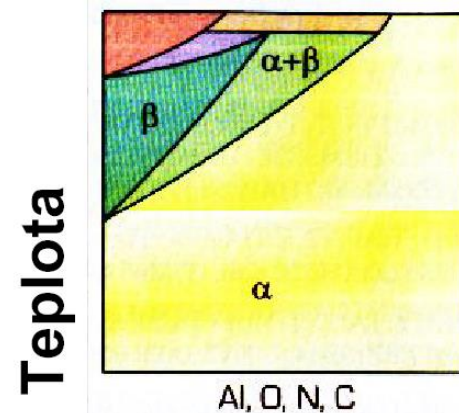


Dělení slitin titanu

Různé přísadové prvky stabilizují různé modifikace polymorfního titanu
Je možno dosáhnout eutektoidní reakce i transformace bezdifúzního typu

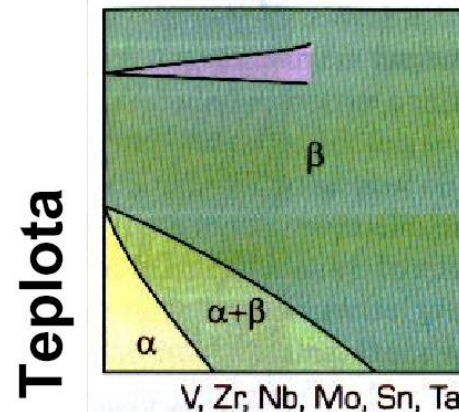
1) Slitiny α

přísadové prvky stabilizující fázi alfa jsou
Al (2-7%), Sn (2-6%), N, O, C



2) Slitiny β

přísadové prvky stabilizující fázi beta jsou
Mo (2-20%), V (2-20%), Cr (2-12%), Nb, Ta



3) Slitiny $\alpha+\beta$ (heterogenní)

Vzájemný poměr fází je dán charakterem
rovnovážného diagramu, obsahem přísado-
vých prvků a podmínkami ochlazování.

měď

Měď₂₉ Cu $T_m = 1085^\circ\text{C}$ $\rho = 8\,940\text{ kg/m}^3$

- nepolymorfní kov, FCC
- velmi dobrá tepelná i elektrická vodivost
- diamagnetická, měkká, tvárná, malá pevnost
- velmi dobrá tvářitelnost, svařitelnost, obtížná slévateľnost (smršťování)
- dobrá odolnost vůči atmosférické korozi
- užití: vodiče (zpevnění tvářením nebo legováním Cd, Cr, Ag, ..), stavebnictví, kryogenní materiál

Slitiny mědi

Slitiny mědi se dělí dle složení do dvou základních skupin:

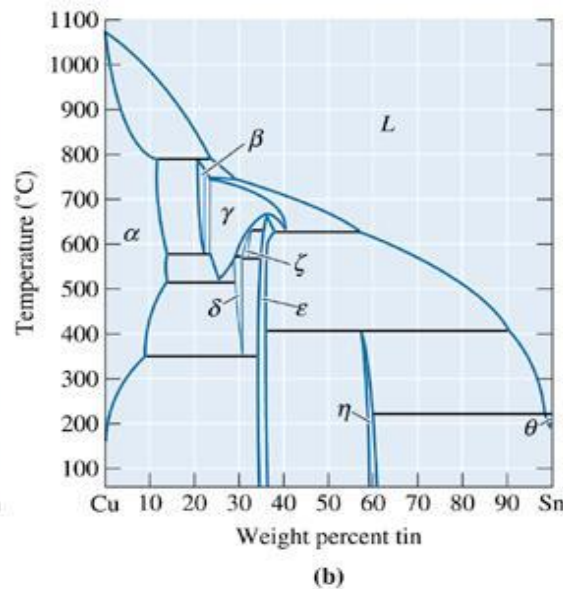
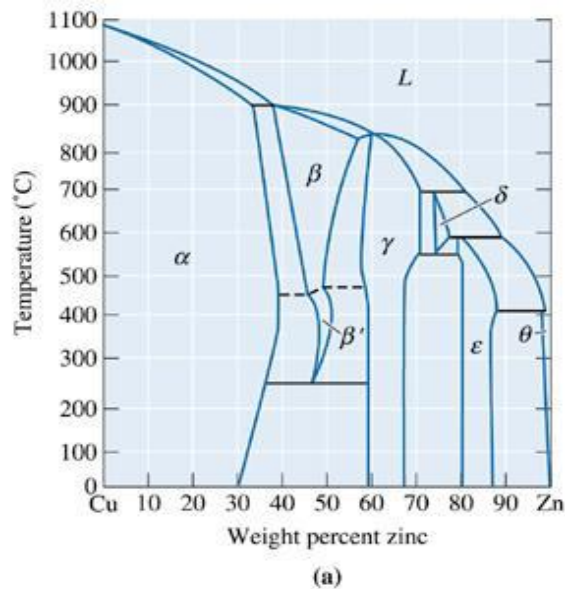
Mosazi – slitiny mědi a zinku

Bronzy – veškeré slitiny mědi s výjimkou soustavy Cu-Zn (tzn. kromě mosazí)

Technologické dělení slitin obecně:

tvářené (zpravidla tuhý roztok)

na odlitky (tuhý roztok + intermediální fáze)



Rovnovážné diagramy
slitin mědi:

(a) Mosaz (Cu-Zn)

(b) Cínový bronz (Cu-Sn)

nikl

Nikl ₂₈ **Ni**, $T_m = 1455^\circ\text{C}$, $\rho = 8908 \text{ kg/m}^3$

nepolymorfní kov, FCC krystalová struktura,

- dobrá tepelná i elektrická vodivost; feromagnetický
- 7. nejrozšířenější kov v zemské kůře
- velmi dobrá korozní odolnost
- dobré mechanické vlastnosti i v čistém stavu **a za záporných teplot**
- asi 60 % Ni se spotřebuje jako přísada do slitinových ocelí (včetně korozivzdorných), kde zvyšuje zejména vrubovou houževnatost při nízkých teplotách, jako konstrukční materiál se používá pro ventilová sedla či součásti parních armatur; v elektrotechnice se Ni využívá pro regulační odpory či odporové teploměry

Slitiny niklu

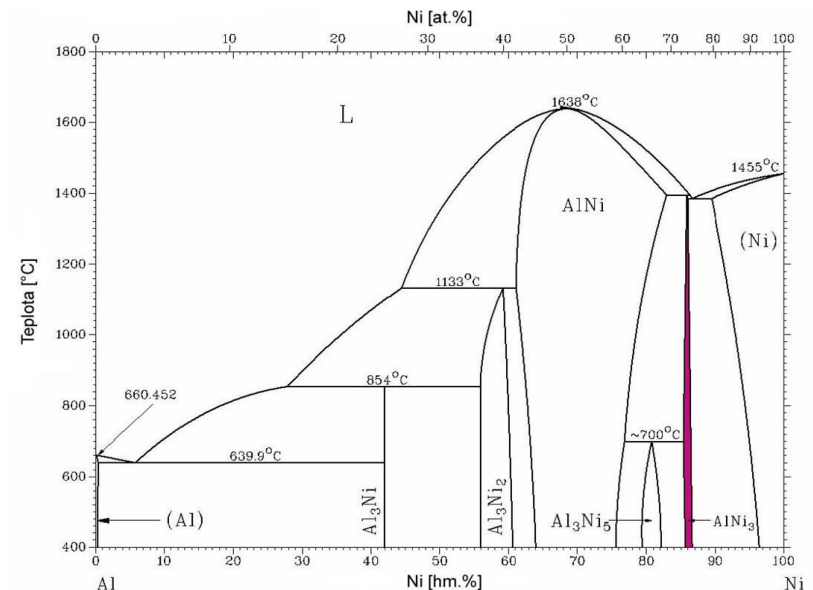
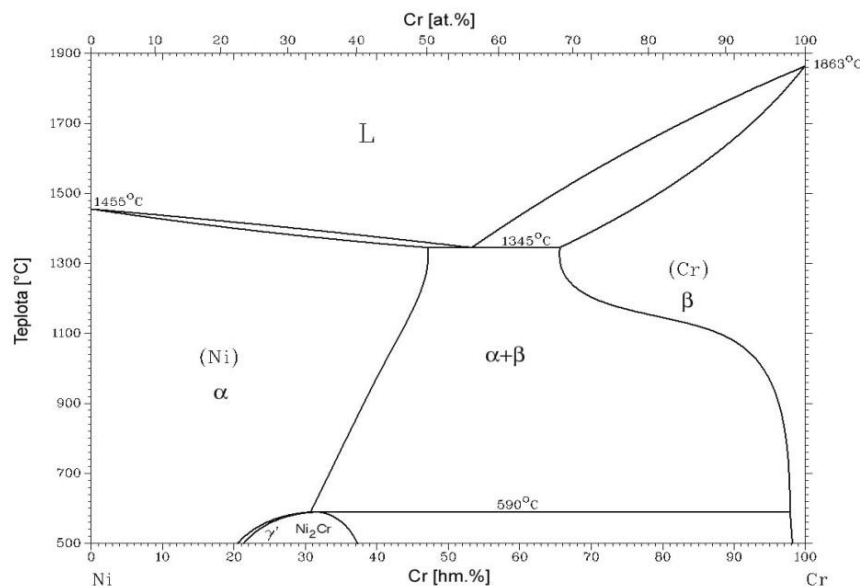
konstrukční slitiny (př.)

- Ni-Cu, Monely, vysoká korozní odolnost, R_m 500-1200 MPa
- Ni-Be, až 20% Be, dobrá houževnatost při R_m až 1800 MPa

slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

- termočlávkové slitiny Ni-Cr x Ni-Si-Mn-Al (Chromel x Alume), do 1000 °C
- odporové slitiny (Ni-20%Cr)
- magnetický měkké slitiny (Permaloy), Ni-20až 60%Fe

žárovzdorné a žárovevné slitiny



Slitiny niklu pro vysoké teploty

žárovzdorné slitiny Ni-15-30 % Cr, až do teploty 1150 °C je tuhý roztok

žáropevné slitiny - celá řada slitin s ochranným označením jako Inconel, Nimonic, Hastelloy

široké rozmezí možného legování

- 12-30% Cr, korozivzdornost, opalu vzdornost, karbidotvorný prvek
- max. 20 % Co, odlitky, zvyšuje teplotu hrubnutí γ' , substituční zpevnění
- max. 50 % Fe, snižuje cenu
- max. 10 % Mo, karbidotvorný prvek, substituční zpevnění
- 2-5 % Ti, γ'
- max. 6 % Al, γ'
- 0,03 až 0,18 C, karbidy

tepelné zpracování- rozpouštěcí žíhání (až 1250 °C) + vytvrzení (850 až 950 °C)

tuhý roztok + γ' -Ni₃(Al, Ti), jemné, stabilní +karbidy M₂₃C₆ a M₆C (M=Cr, Mo, Fe) na hranicích zrn, kde brání pokluzům