

## Nové možnosti rozvoje vzdělávání na Technické univerzitě v Liberci

Specifický cíl A3: Tvorba nových profesně zaměřených studijních programů

**NPO\_TUL\_MSMT-16598/2022**



# Konstrukční materiály používané ve strojírenství



Ing. Pavel Brabec, Ph.D. - Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

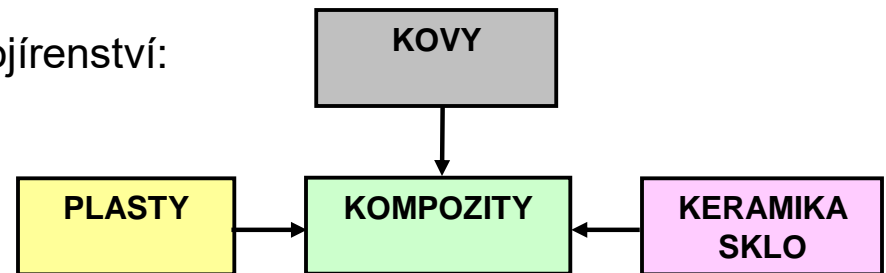
## Materiály ve strojírenství

Vývojové etapy lidstva nesou názvy podle materiálu, který byl objeven a používán:

- doba **bronzová** (3000 – 5000 let p.n.l.)
- doba **železná** (od 1500 let p.n.l. až do 20. století n.l.)
- současná etapa má povahu **multimateriálovou** (vedle kovových materiálů plasty, kompozity, křemík v elektrotechnice apod.) - materiály jsou klíčem k inovacím v tomto tisíciletí (k dispozici je dnes 40 000 až 80 000 různých materiálů a často jsou připravovány pro speciální použití)

Základní rozdělení materiálů používaných ve strojírenství:

- Kovy železné a neželezné
- Plasty
- Keramika, sklo
- Kompozity



Suroviny pro výrobu materiálů pro strojírenství jsou získávány ze Země (zemské kůry nebo z hlubin – nerosty/rudy, organické látky). Pouze výjimečně se naleznou čisté kovové nerosty (v Australii zlatý valoun cca 70 kg, v USA balvan mědi 500 tun). Většinou jsou kovy v nerostech (rudách) obsaženy jako sloučeniny nebo příměsi s kyslíkem, sírou, uhlíkem a jinými prvky. Čisté kovy se z rud získávají tavením a vhodnými chemickými procesy.

Nejvýznamnějšími surovinami pro výrobu kovových materiálů jsou železná ruda (oxidy železa) pro výrobu železných kovů a bauxit (oxidy hliníku). Ze železné rudy se železo vyrábí tavením ve vysokých pecích (teplota tavení železné rudy je cca 1600 °C), hliník se z roztaveného bauxitu získává elektrolýzou (teplota tavení bauxitu je 2000 °C, k jejímu snížení se používá další nerost, kryolit, jehož přísadou lze teplotu tavení snížit až na 1000 °C – i tak je výroba hliníku energeticky velmi náročná).

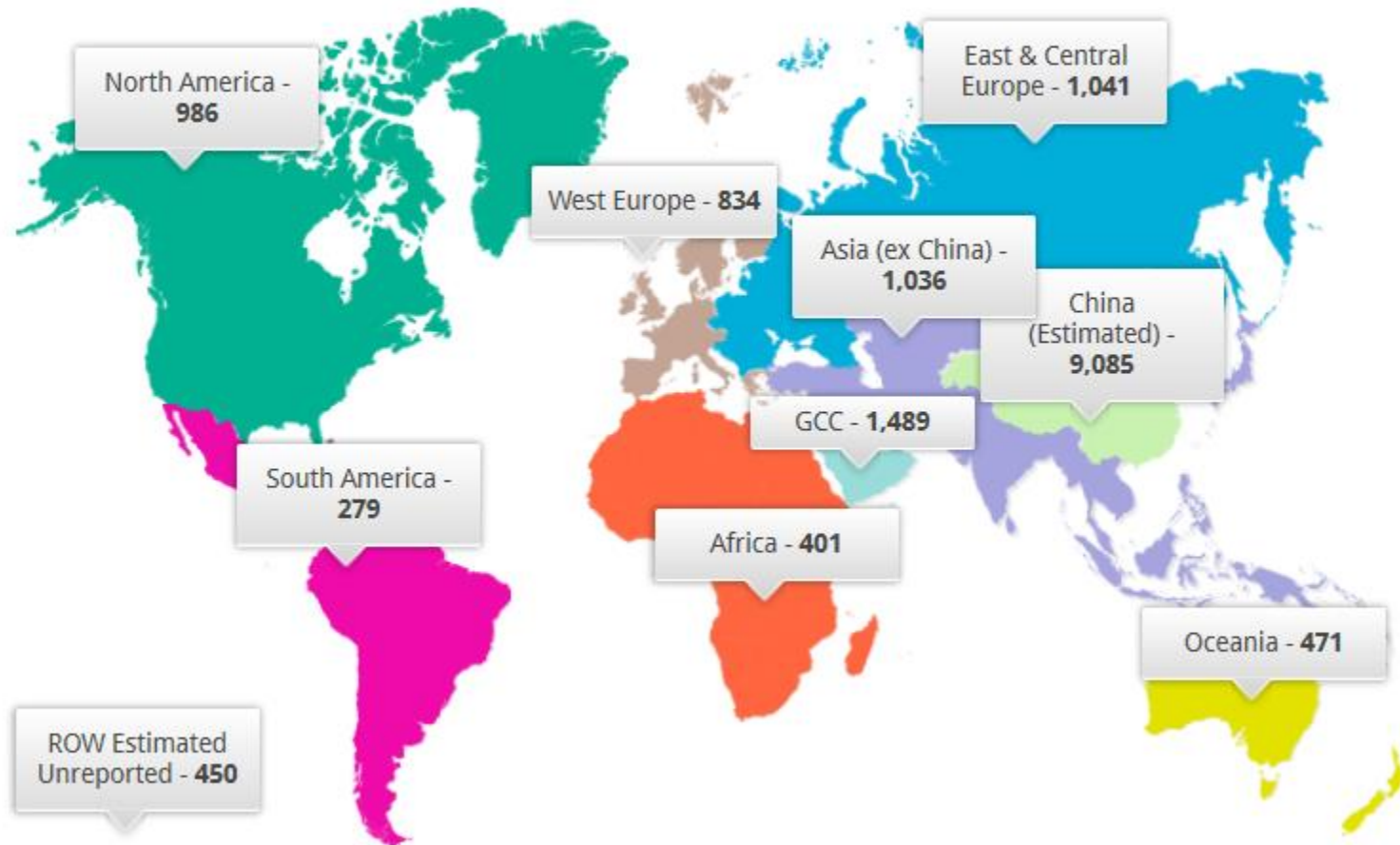
## Statistika výroby oceli

Teritorium	2007	2011	2012	2013	2014	2015	2016	změna v %	
	tis.t	tis.t	tis.t	tis.t	tis.t	tis.t	tis.t	16/15	16/07
Země EU-28	210 260	177 791	168 589	166 356	169 301	166 115	162 037	-2,5	-22,9
Ostatní Evropa	30 533	39 079	39 917	38 627	38 374	35 778	37 651	5,2	23,3
Země SNS	124 169	112 663	110 739	108 408	106 079	101 552	102 360	0,8	-17,6
Severní Amerika	132 618	118 675	121 586	118 978	121 093	110 938	110 624	-0,3	-16,6
Jižní Amerika	48 232	48 165	46 379	45 822	45 043	43 899	40 220	-8,4	-16,6
Afrika	18 675	15 696	15 337	15 963	14 885	13 701	13 099	-4,4	-29,9
Střední Východ	16 452	23 230	24 979	26 967	29 986	29 429	31 480	7,0	91,3
Čína	489 712	701 968	731 040	822 000	822 750	798 785	808 370	1,2	65,1
Ostatní Asie	268 673	293 489	295 761	301 646	316 917	309 048	317 873	2,9	18,3
Oceánie	8 783	7 248	5 805	5 588	5 466	5 717	5 837	2,1	-33,5
<b>Celkem svět</b>	<b>1 348 107</b>	<b>1 538 004</b>	<b>1 560 132</b>	<b>1 650 355</b>	<b>1 669 894</b>	<b>1 614 962</b>	<b>1 629 551</b>	<b>0,9</b>	<b>20,9</b>

Zdroj: Statistika Worldsteel association (WSA), worldsteel 103, březen 2017

# Statistika primární produkce hliníku

Total for Q1 2020 to Q4 2020: 16,072 thousand metric tonnes of aluminium

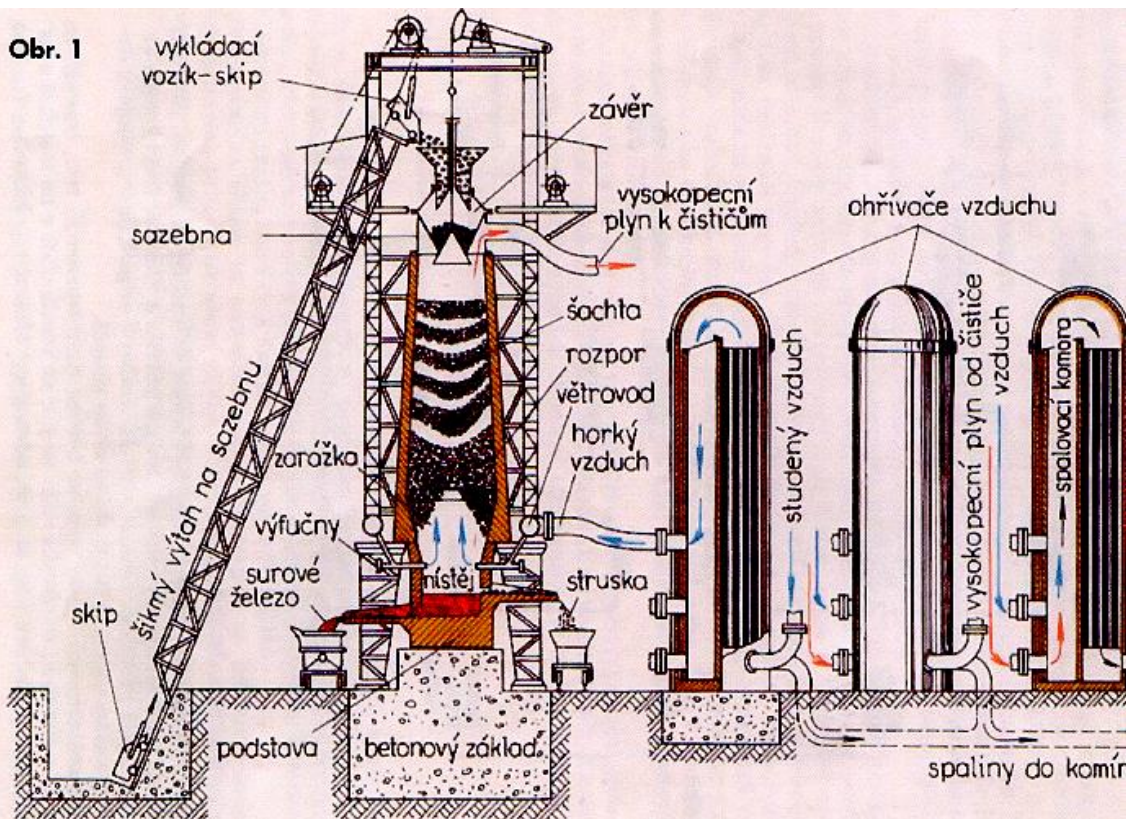


kapacita primárního hliníku pro Q1 2020 až Q4 2020 je asi 16 072 tisíc metrických tun

Zdroj: [www.aviationaluminum.com](http://www.aviationaluminum.com)

**Železná ruda** je oxidem železa, který se účinkem vysoké teploty taví a za přítomnosti uhlíku (dříve dřevěné uhlí, později koks) se kyslík uvolňuje od železa, váže se na uhlík a v podobě oxidů uhlíku odchází a v reakční nádobě zůstává železo.

**Tavení železné rudy** se uskutečňuje ve vysokých pecích – produktem tavení ve vysokých pecích je „surové“ železo, obsahující velké množství uhlíku. Kvalitní ocel se vyrábí odstraňováním uhlíku a přidáváním jiných vhodných přísad (legur) v jiných ocelářských pecích (Siemens-Martinská, elektrická oblouková, konvertor, ... ), litiny se získávají úpravou surového železa v kuplovnách.



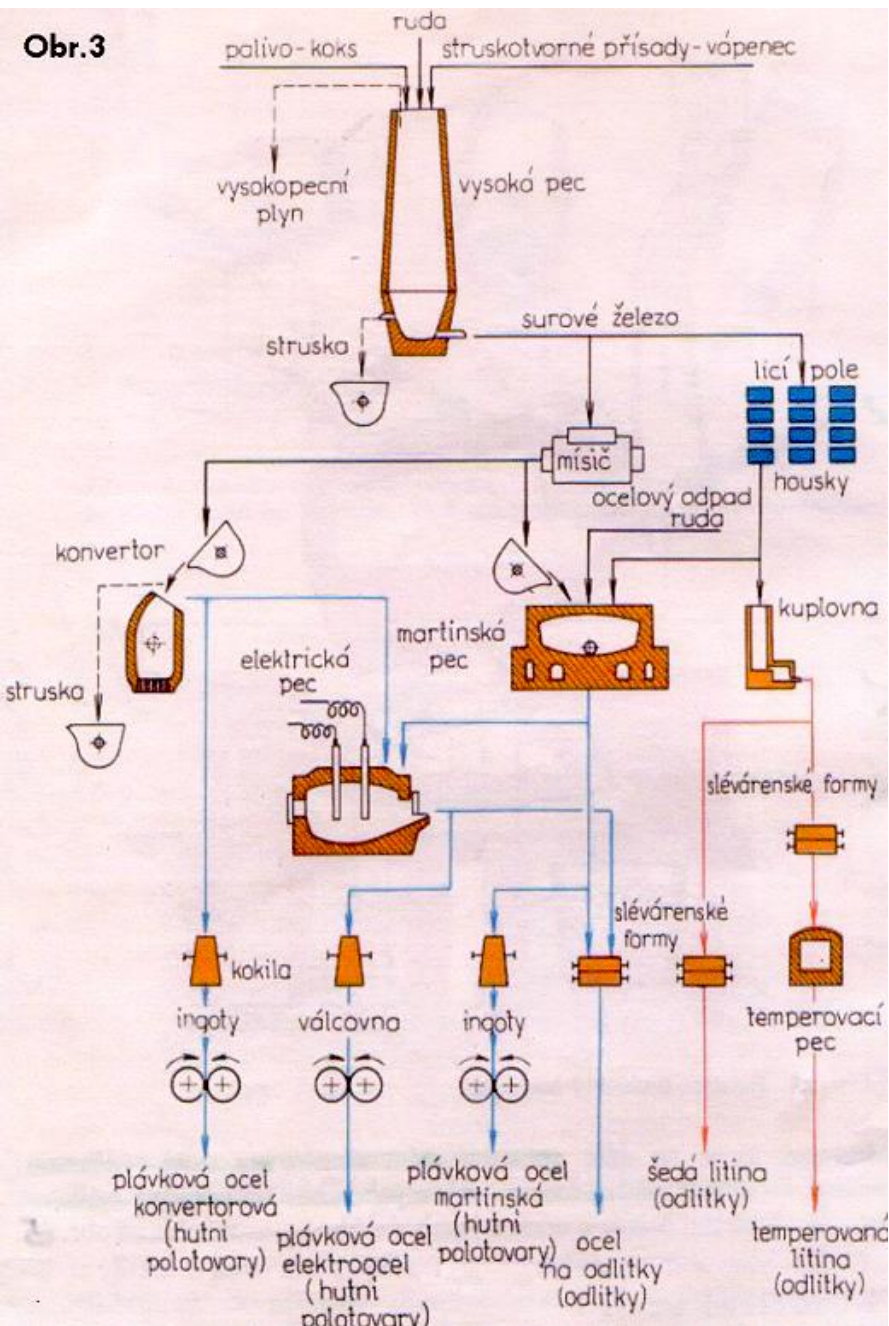
**Vysoká pec** je protiproudý reaktor, pracující dlouhodobě v nepřetržitém provozu (10 až 15 let): plnění pece, dmýchání větru a odvod plynu jsou prakticky kontinuální plynulé procesy, vypouštění strusky a odpich surového železa (s teplotou 1600 °C) se k plynulosti blíží.

Nízká spotřeba energie ve vysoké peci je zajištěna využíváním vysokopečního (kychtového) plynu k ohřevu vzduchu (větru) pro přívod do reakční šachty.  
 Kycht.plyn:  $\approx 4\% \text{H}_2$ ,  $\approx 26\% \text{CO}$ ,  $10\% \text{CO}_2$ ,  $60\% \text{N}_2$ .

Příklad menší v.p. s produkcí surového železa  $\approx 200$  tun/den:  
 Výška  $\approx 30$  metrů, denní vsázka 475 tun ž.r., 200 tun koksu, 50 tun přísad



Obr.3



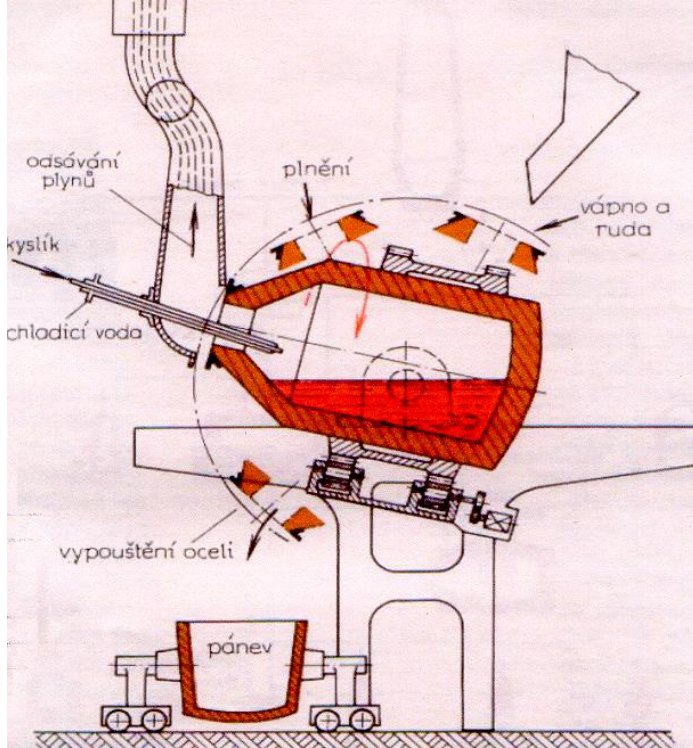
Surové železo obsahuje kromě 3,5-4,5% uhlíku ještě křemík, mangan, fosfor a síru a jejich obsah se musí upravit tak (spolu s dodáním jiných prvků – Ni, Mo, W, V), aby vyrobená ocel měla potřebné mechanické vlastnosti i tvárnost za tepla a za studena. C, Mn, Si a P mají vysokou afinitu ke kyslíku: CO uniká z taveniny jako plyn, kysličníky dalších prvků vytvářejí na povrchu taveniny strusku. Surové železo se z velké části spotřebuje na výrobu oceli.

## Rozdělení technických slitin železa

Technické slitiny železa

Kujná železa  
Obsah uhlíku  
< 2,14%

Surová železa  
nekujná  
Obsah uhlíku  
> 2,14%



### Rozdělení ocelí:

- třídy 10 - ocel obvyklých jakostí, běžná stavební ocel
- třídy 11 - konstrukční
- třídy 12 - ušlechtilé uhlíkové oceli - mají předepsaný obsah prvků hlavně C, P, S, Si, Mn
- třídy 13 - převážně pružinová ocel, legované především Mn
- třídy 14 - chromová ocel, nízkolegovaná, pro výrobu se používá chrom + další prvky hlavně Si, Mn
- třídy 15 - molybdenová ocel, nízkolegovaná
- třídy 16 - niklová ocel, nízká a středně legovaná, používají se kombinace legovacích prvků: Ni+Cr, Ni+V, Ni+V+W
- třídy 17 - žáruvzdorné, žárupevné a korozivzdorné oceli jako např.: nerez, středně a vysoce legované
- třídy 19 - nástrojové oceli
- na odlitky

Konvertory jsou různé konstrukce (Bessemerův, Thomasův, kyslíkový, ...). V nádobě hruškovitého tvaru se v tavenině surového železa snižuje obsah C, Mn, Si a P vháněním stlačeného vzduchu do dna a atmosférickým kyslíkem dochází k jejich oxidaci. Kyslíkový konvertorový proces (viz obr.) se vyznačuje vyšší produktivitou výroby oceli než jiné hutnické (ocelářské) postupy (např. nístějová Siemens-Martinská zkujňovací plamenná pec).

V hutích se taveniny ocelí odlévají do tvarově jednoduchých kovových forem tzv. **kokil**, jejichž dutina má tvar komolého jehlanu nebo kužele. Získané odlitky (**ingoty**) mají délku 2 až 3 m s hmotností až 300 t.

Z ocelárny odchází horké ingoty v kokilách do stripovací haly, kde jsou kokily stahovány z ingotů speciálními jeřáby. Ingoty se pak dopravují do haly hlubinných pecí a předeřádávají se na teploty 1200 °C. Podle následného tvářecího procesu jsou ingoty buď pro **válcovny** nebo **kovárny**.

Ve válcovnách se ingoty válcují za tepla několika průvaly: k válcování se používají válcovací tratě s válcovacími stolicemi ve kterých ingot prochází mezi rotujícími válci a tím dochází k jeho tvarování (zmenšování příčného průřezu a profilování, zvětšování délky). Válcováním se zpracovává 85 až 90 % vyráběné oceli.



Teplota tání čistého železa je 1529 °C. Čisté železo krystalizuje v soustavě krychlové ve více modifikacích ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), které se tvoří v závislosti na teplotě a podmínkách krystalizace.

Technické železo obsahuje řadu příměsí, nejdůležitější je uhlík, který se v železe vyskytuje ve dvojitě podobě:

- elementární grafit
- karbid železa  $\text{Fe}_3\text{C}$  (čistý karbid železa obsahuje 6,67% C)

Struktury technického železa po krystalizaci se nazývají

- 0 – 2% C : austenit
- 2 – 4,3% C: austenit + ledeburit
- 4,3% C: ledeburit
- > 4,3% C: cementit + ledeburit

Oceli k tváření se podle použití dělí na *konstrukční a nástrojové*, podle chemického složení se dělí na *uhlíkové a slitinové*.

Oceli uhlíkové jejich vlastnosti jsou dány především obsahem uhlíku. Dělíme je na *nízkouhlíkové* do 0,25 % C, *středněuhlíkové* od 0,25 do 0,6 % C, *vysokouhlíkové* nad 0,6 % C.

Oceli slitinové (legované) se dělí na *nízkolegované* se součtem prvků mimo uhlík nad 2,5 %, *středně legované* od 2,5 do 5 % *výše legované* 5 až 10 % *vysoce legované* se součtem legujících prvků nad 10 %. Vlastnosti těchto ocelí jsou dány druhem a množstvím legujících prvků (přísad).

## Litiny

Jsou slitiny železa s uhlíkem (s obsahem větším než 2 %) a dalších prvků Si, Mn, P, S. Podle chemického složení a podle podmínek tuhnutí taveniny slitiny železa s uhlíkem a dalšími prvky vzniká eutektikum buď cementitické (ledeburit - podstata bílé litiny) nebo grafitické (šedá litina).

Přechod mezi těmito druhy litin tvoří litina *přechodová* (maková), která obsahuje vedle grafitu i cementit.

Materiály, používané ve strojírenství ke stavbě strojů a zařízení, musí mít potřebné **mechanické vlastnosti** z hlediska konstrukce, **technologické vlastnosti** s ohledem na způsob výroby a příp. jiné **specifické vlastnosti** z hlediska funkce ve stroji (zařízení).

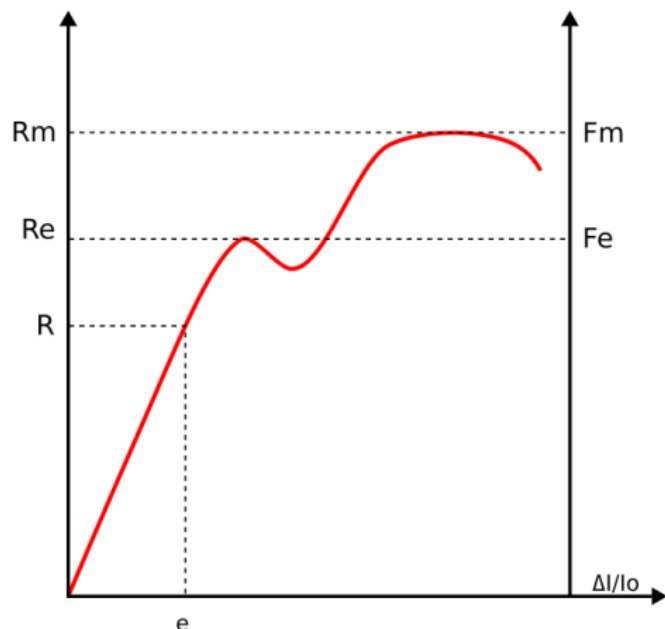
### Mechanické vlastnosti

- Pevnost, modul pružnosti
- Mez úměrnosti
- Mez pružnosti
- Mez únavy - únavová pevnost (nejvýznamnější parametr)
- Houževnatost (schopnost deformací, náchylnost ke zlomení)
- Vrubová houževnatost (citlivost na tvarové změny)
- Tvrdost

### Příklad vybraných vlastností ocelí:

Ocel uhlíková	- pevnost	700 MPa
	- mez pružnosti	400 MPa
	- mez únavy	33 MPa
Ocel slitinová	- pevnost	1050 MPa
	- mez pružnosti	950 MPa
	- mez únavy	50 MPa

### Trhací (pracovní) diagram oceli



R – mez úměrnosti

$Re$  – mez kluzu (poslední přípustný stav namáhání)  
následně - zpevňování materiálu

$Rm$  – maximální napětí (začátek kontrakce průřezu)  
následně - přetržení zkušební vzorku

## Neželezné kovy a jejich slitiny

**Hliník** a slitiny hliníků patří mezi nejvýznamnější neželezné kovy, vyniká velmi dobrou elektrickou vodivostí, dobrou korozní odolností a nízkou měrnou hmotností. Má velmi dobrou zpracovatelnost (plechy, pásy a folie pro obaly, dráty pro elektrotechniku, lisované profily od jednoduchých až po komplikované průřezy pro použití ve stavebnictví i strojírenství a profily i plechy ze slitin vysoké pevnosti pro letectví).

**Měď** a slitiny mědi patří k nejrozšířenějším neželezným kovům. Slitiny mědi se dělí na mosazi (slitiny se zinkem) a bronzы (slitiny s ostatními kovy mimo niklu).

**Olovo** je typické svou velkou měrnou hmotností (s níž souvisí i velká schopnost pohlcování záření) a odolností proti působení kyselin.

**Zinek** vyniká odolností proti atmosférické korozi a slabším zásadám. Slitiny zinku jsou vhodné pro výrobu složitých tenkostěnných odlitků s dobrou pevností.

**Hořčík** má nejmenší měrnou hmotnost z běžných kovů a jeho slitiny se s výhodou používají na odlitky tlakově lité.

**Nikl a slitiny niklu** se vyznačují především velkou odolností proti korozi a dobrými mechanickými vlastnostmi i za vyšších teplot, velká část čistého niklu se spotřebuje do slitinových ocelí a na povrchové úpravy. Slitiny niklu se železem (a případně dalšími prvky) mají specifické fyzikální vlastnosti, především magnetické nebo elektrické (velký odpor) a slitiny s chromem tvoří základ slitin žárupevných.

**Titan a jeho slitiny** jsou novým konstrukčním materiálem. Čistý titan má nízkou měrnou hmotnost ( $4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), vynikající korozní odolnost a dobré mechanické vlastnosti.

**Molybden a wolfram** jsou kovy s nejvyššími teplotami tavení a mají významné použití v elektrotechnice i jako legující prvky při výrobě speciálních ocelí a slitin.

**Plasty:** organické látky – polymery (kromě polymeru obsahují plasty různé přísady k úpravě jejich vlastností – plniva, barviva, stabilizátory, změkčovadla apod.)

**TERMOPLASTY:** mají schopnost opakovaně ohřevem měknout a ochlazením tuhnout v teplotním intervalu charakteristickém pro daný plast. Příklady - polyethylen PE, polypropylen PP, Polyvinylchlorid PVC, polystyren PS, polyethylentereftalát PET, polyamid PA, polyuretany PUR.

**REAKTOPLASTY:** materiály, které mohou být převedeny do netavitelného a nerozpustného stavu účinkem tepla, záření nebo katalyzátoru s tvořením příčných vazeb mezi makromolekulami polymeru s prostorovou strukturou (tzv. vytvrzování). Proti termoplastům jsou vysoce tuhé a tvrdé, tepelně odolné a stálé za tepla, odolné vůči povětrnosti a korozi: nevýhodou je jejich malá tažnost. Používají se jako lisovací hmoty, nátěrové hmoty, lepidla, tmely, vrstvené lamináty, zalévací hmoty. Příklady – fenolplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery, silikonové pryskyřice.

**ELASTOMERY** jsou polymery, které mají ve svém makromolekulárním řetězci reaktivní místa, umožňující chemickou reakcí (vulkanizací pomocí vulkanizačního činidla) vytvořit prostorovou síť, ve které jsou původně lineární makromolekulární řetězce kaučuku pospojovány chemickými púčnými vazbami. Vlastnosti elastomeru jsou určovány koncentrací púčných vazeb a chemickou strukturou při vulkanizaci se surovina (tvárný kaučuk) mění na pryž, jejíž základní vlastností je schopnost velké elastické deformace při zatěžování v tahu. Kaučuk je buď přírodní nebo syntetický (1,3 butadien, butadienstyren a pod). Jako plnivo se do kaučuku při výrobě pryže používají saze (zvyšují pevnost, tvrdost a působí proti opotřebením).

*Charakteristické vlastnosti pryže:*

- odrazová pružnost
- odolnost proti opotřebením a cyklickým deformacím
- chemická odolnost
- nepropustnost pro plyny a vodu
- elektroizolační vlastnosti

Elastomery mohou být jak pro všeobecné použití, tak pro speciální případy (olejovzdorné, teplotovzdorné).



**KERAMIKA:** anorganická nekovová látka s heterogenní polykrystalickou strukturou, připravená slinováním za zvýšených teplot. Základní materiál vypálených výrobků (střep) je tvořen krystaly jednoho nebo více druhů sloučenin, skelnou fází a póry. Tato mikrostruktura má pro vlastnosti a chování keramiky rozhodující význam a je stejně důležitá jako chemické složení střepu.

Základ klasické keramiky tvoří křemičitany hliníku a hlinitanokřemičitany alkalických kovů (porcelán, poloporcelán, kamenina apod).

Keramika na základě sloučenin titanu: oxid titaničitý, titaničitany alkalických zemin a jejich pevné roztoky s jinými sloučeninami se uplatňují jako keramické dielektrikum, pevné roztoky titaničitanů a zirkoničitanů olovnatých tvoří **piezokeramických hmot**.

Keramika na základě oxidu železitého v kombinaci s dalšími oxidy tvoří **ferity** pro použití v elektrotechnice a elektronice. Podobné složení má keramika, používaná k výrobě prvků s teplotně silně závislým elektrickým odporem (**termistory**).

Oxidová keramika bez přísad taviv s vysokou chemickou čistotou materiálu (až 99,9% oxidu ve střepu) se používá pro zvláště **náročné technické účely** (elektroniku, jadernou techniku, techniku vysokých teplot).

Bezokyslíkatá keramika je složena z *karbidů, nitridů, boridů* apod., vyžaduje odlišný způsob zpracování od běžné keramické technologie a má zcela **mimořádné technické parametry** (vysoké odolnosti proti opotřebení, vysoké pevnosti v žáru, odolnosti proti teplotním nárazům, vysoké tepelné vodivosti apod.).

**KOMPOZITNÍ MATERIÁLY** jsou heterogenní materiály tvořené dvěma, popř. více fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se liší také svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Jedna z fází tvoří matici kompozitu a je spojitou fází. Sekundární fáze zpevňující matici kompozitu je obvykle nespojitá, tvořená částicemi různého typu a tvaru. Významnou vlastností složených materiálů je především jejich vysoká měrná pevnost a u některých druhů také dobrá žarupevnost nebo odolnost proti korozi apod. Kompozity různého druhu se uplatňují v leteckých konstrukcích, v raketové technice, v dopravě, v chemickém průmyslu, ve výrobě sportovních potřeb aj.

**Matrice** kompozitu má nižší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu a často má také nízkou hustotu. Základní funkcí matrice je přenos vnějšího zatížení na zpevňující fázi. Matrice dále spojuje částice zpevňující fáze, chrání je před mechanickým, popř. chemickým poškozením. Matrice odděluje jednotlivé částice zpevňující fáze a brání rozvoji křehkého porušení kompozitu a může být kovová, polymerní nebo silikátová.

**Zpevňující fáze** má vysokou pevnost, vysoký modul pružnosti  $E$  (o řád vyšší než modul pružnosti matrice) a malou deformaci do lomu (1 až 2 %) při vysokém podílu pružné deformace. Zpevňující fáze přenáší převážnou část vnějšího zatížení a může být kovová, skleněná nebo keramická, popř. mohou být kompozity zpevněné vláknovými monokrystaly (whiskery). Podle tvaru zpevňující fáze jsou kompozity s částicovou zpevňující fází (kulovitý, deskovitý nebo tyčkovitý tvar) nebo s vláknovou (průběžnou nebo krátkou) zpevňující fází.

**Rozhraní** mezi maticí a zpevňující fází (vrstva mezi stykem obou fází) je podmínkou pro dobrou soudržnost obou fází i potlačení chemických reakcí na fázovém rozhraní matrice a zajišťuje potřebné vlastnosti kompozitu. Pro určitý typ zpevňující fáze je proto nutné použít jen určité druhy matrice, popř. vytvořit vhodnou ochrannou vrstvu na povrchu zpevňující fáze.

## KRITÉRIA VOLBY VHODNÝCH MATERIÁLŮ PRO PRAKTICKÉ APLIKACE

Pevnost materiálu je téměř vždy nejvýznamnějším hlediskem při volbě materiálu pro danou aplikaci. O mechanických vlastnostech materiálu (tzv. materiálových charakteristikách) lze většinu informací získat z různých materiálových databází.

Materiálové náklady: komplexní problém, který se netýká jen ceny zvoleného materiálu a technologie jeho zpracování, do výpočtu nákladů je nutné zahrnout ale i náklady na dopravu, povrchovou úpravu aj.

Technologie výroby s ohledem na rozměry, tvar, požadovanou kvalitu povrchu součásti, sériovost výroby apod. být určena tak, aby se maximálně využil materiál a minimalizovaly se výrobní náklady (prosazují se bezodpadové technologie: tváření, přesné lití, prášková metalurgie, minimum obrábění, ...)

Ekologičnost použití zvoleného materiálu: důsledky zvoleného materiálu na životní prostředí (přímé nebo nepřímé) z hlediska výroby materiálu, technologie jeho zpracování, možná rizika při jeho použití v konkrétním stroji nebo zařízení, likvidace s možností recyklace a pod.

Znalost zatížení a prostředí při provozu stroje nebo zařízení, sortiment polotovarů, omezení daného výrobního zařízení, věrohodnost vstupních dat tj.

# POVRCHOVÉ ÚPRAVY KOVŮ A SLITIN

Důvody k povrchové úpravě jsou dány požadavkem na dosažení určitých vlastností:

- Odolnost proti korozi
- Odolnost proti opotřebení
- Odolnost proti vysokým teplotám
- Vzhled

Povrchové úpravy materiálů a strojních součástí slouží především k ochraně proti korozi a provádí se pomocí ochranných vrstev (je se základním materiálem neoddělitelně spojena) a povlaků (je na základním materiálu vytvořena přilnavostí).

Ochranná vrstva se vytváří vzájemným působením základního materiálu a prostředí, v technologiích povrchových úprav se nejčastěji uplatňují povlaky.

- Moření – rozpouštění korozních produktů z povrchu kovových součástek za pomoci kyselin (k. solná, dusičná, fluorovodíková, fosforečná aj.), provádí se v mořících autoklávech.
- Kovové povlaky:
  - chemickým pokovováním v lázních roztoku soli kovu, kterým se pokovuje (měď, cín, nikl, stříbro)
  - elektrochemické (galvanické) pokovování v lázních roztoku soli kovu, kterým se pokovuje (měď, cín, nikl, zinek, nikl, chrom, stříbro, zlato), tloušťky povlaků lze přesně řídit (obvykle  $10^{-4}$  až  $10^{-3}$  mm).
  - pokovování v roztavených kovech (povlaky ze zinku, cínu, olova).
  - povlaky stříkané za vysokých teplot (metalizace – šopování): natavený povlakový kov se rozstříkuje stlačeným vzduchem na povrch (plynová metalizace, elektrometalizace, plazmová metalizace)
  - pokovování ve vakuu (povlakový kov je ohřátý nad teplotu odpařování ve vakuu a páry kovu dopadají na povrch materiálu – velmi tenké povlaky s vysokým leskem)
- Nekovové anorganické povlaky (fosfátování v lázni fosforečnanů při teplotách cca 75 °C, řízená oxidace hliníkových slitin se vznikem  $Al_2O_3$  - eloxování), keramické smalty (sklovina na povrchu oceli slinuje při cca 800 °C a na hliníku při 580 °C s vytvářením křemičitanů s obsahem kovových kyslíčků).
- Povlaky z organických nátěrů: roztírání štětcem, stříkání, máčení, elektroforetické namáčení (v automob.prům.)