

# Fyzikální základy vědy o materiálu

## Předmluva.

Na Přírodovědecké fakultě Masarykovy Univerzity v Brně je konána již téměř 20 let přednáška s názvem „Mechanické vlastnosti pevných látek“. Původně byla určena studentům odborné fyziky a studentům doktorského studia. Postupem času, zejména s nástupem kreditového systému, projevoval o přednášku zájem stále větší počet studentů tzv. nefyzikálních a nematematických oborů (např. studenti oboru geologie na Př.F MU).

Aby bylo možné vyhovět požadavkům všech studentů, rozhodli jsme se přednášku rozdělit na dvě části: první, která jde do hloubky problému a je poměrně úzce zaměřena a druhou, která podává širší přehled o různých oblastech fyziky materiálů, avšak z pochopitelných důvodů nemůže jít příliš do hloubky. Naše rozhodnutí podpořil později i požadavek Katedry základů techniky PdF MU, aby pro všechny studenty tohoto oboru byla tato přednáška zavedena povinně (2. semestr, 2 hodiny týdně, zkouška). Tím vzrostl celkový počet studentů až na 150.

V roce 2007 bude přednáška navíc součástí výuky studentů „následného magisterského studia učitelů odborných předmětů na středních školách“ (dalších cca 50 studentů).

Všechny uvedené důvody profilují celou přednášku a kladou na ni následující požadavky:

- a) Nemůže být příliš náročná na předcházející fyzikální a matematickou přípravu.
- b) Nemůže jít příliš do hloubky.
- c) Musí podat co možná nejnázornějším způsobem přehled o tradičních i moderních oblastech fyziky materiálů.
- d) Je časově omezena na jeden semestr, 2 hodiny týdně. Případné samostudium nemůže být příliš rozsáhlé (z uvedených důvodů).

Proto závěrem prosíme všechny odborníky, vědce i učitele, kteří na jiných univerzitách v ČR konají přednášky podobného typu o uvážení (při případné kritice, které se ovšem nevyhýbáme), všech našich důvodů, které nás vedly k sestavení přednášky právě v tomto složení a náročnosti.

# **1. Úvod**

Nauka o materiálu a zejména její praktické využití je s lidskou existencí spjata snad nejvíce ze všech věd. Stravování, bydlení, odívání, doprava, zábava atd., jsou podmíněny využíváním celé množiny materiálů. Již od základní školy víme, že celá historická období vývoje lidstva jsou nazývána podle materiálů v té době nejvíce využívaných (doba kamenná, bronzová, železná). Lze konstatovat, že existence lidstva závisela (a stále závisí) na schopnosti využívání vhodných materiálů.

Na úsvitu dějin lidé využívali jenom omezené množství materiálů, jako např. kámen, dřevo, kůže, kosti a hlinu. S postupem času se toto spektrum rozšiřovalo a nové materiály často vznikaly z materiálů původních, s použitím speciálních technologií (někdy bohužel již zapomenutých). Po dlouhé stovky tisíc let byly tyto technologie rozvíjeny extenzivně a byly předávány z otce na syna, případně z mistra na učedníka. Teprve v historicky nedávné době (tj. asi v polovině minulého století) dochází k intenzivnímu rozvoji materiálových technologií, tj. k pronikání zejména fyzikálních poznatků a metod do vědy o materiálu. Výsledky tohoto kvalitativního skoku na sebe nedaly dlouho čekat, setkáváme se s nimi na každém kroku, ať se jedná o nové slitiny kovů, plasty, keramika, kompozity, materiály pro mikroelektroniku a mnoho dalších (stačí se zamyslet nad materiály, z nichž se skládá např. mobilní telefon, automobil, počítač a další předměty denní spotřeby).

Rozvoj nových technologií tak činí náš život mnohem snadnějším a již si ani nedovedeme představit naši existenci bez běžných předmětů denní spotřeby a tedy bez nových materiálů (tato situace má však i svoji stinnou stránku – kolaps, ke kterému by došlo při výpadku např. takového zdroje energie, jakým je nafta, by byl pro naši civilizaci fatální).

V dalších kapitolách se pokusíme podat přehled o způsobu a výsledcích pronikání fyzikálních poznatků a metod do tak tradičně fenomenologické oblasti, jakou je věda o materiálu.

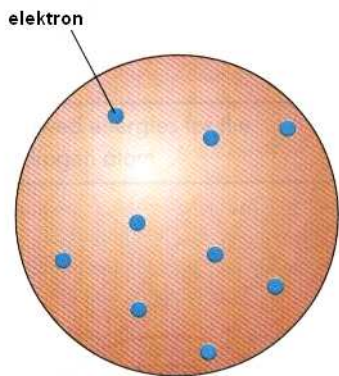
## **2. Atomová struktura látek.**

Znalost meziatomových vazeb umožňuje vysvětlit, resp. předvídat vlastnosti materiálů známých, resp. vyvíjených. Podstata těchto vazeb spočívá ve vlastnostech samotných atomů – základních stavebních kamenů všech látek. Proto uvedeme nejdříve stručný přehled teorií složení atomů.

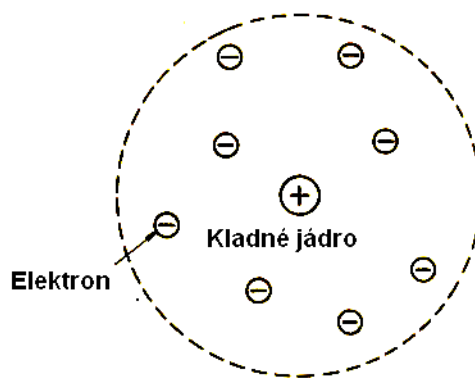
### **2.1. Struktura atomů.**

Již v dávných dobách lidé tušili, že hmota má i při svém spojitěm vzhledu určitou strukturu, že je tedy složena z velmi malých, našimi smysly nepostižitelných částic. První, kdo jasně formuloval tento názor, byl řecký filosof Démokritos (460-371 př.n.l.), od něhož pochází i název těchto malých částic – atomy ( $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  = nedělitelný).

V 19. století přijali vědci myšlenku, podle níž se chemické prvky skládají z atomů, o atomech samých však nevěděli téměř nic. Po objevu elektronu a zjištění, že všechny atomy obsahují elektrony, navrhl J.J.Thomson první model atomu, tzv. „puďinkový model“ atomu. Podle něho jsou atomy elektricky neutrální částice, které představují kuličky kladně nabitě hmoty, v níž jsou jako rozinky v puďinku umístěny záporně nabitě elektrony (Obr.2.1). Experimentální ověření tohoto modelu prokázalo, že není správný, přinejmenším v tom smyslu, že neobsahuje spojitě rozložený kladný náboj. Proto předložil E. Rutherford druhý model, podle něhož existuje uprostřed atomu kladné jádro a elektrony jsou rozptýleny rovnoměrně v celém objemu atomu (Obr.2.2).

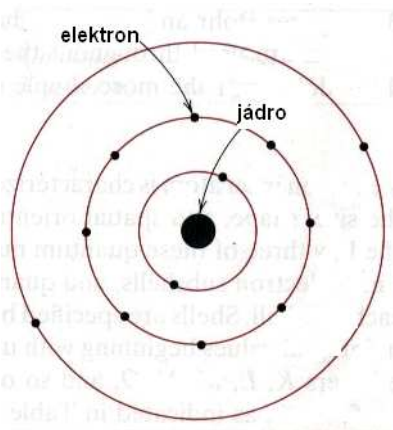


Obr.2.1. Thomsonův model atomu

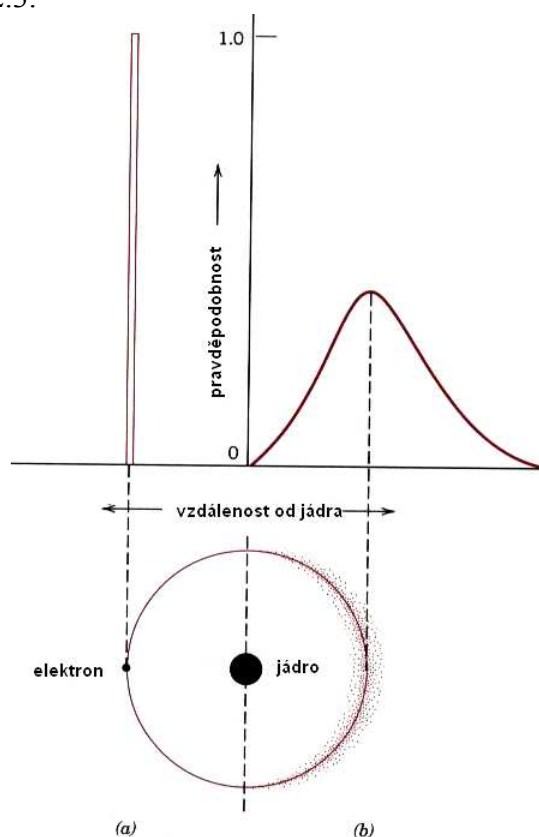


Obr.2.2.. Rutherfordův model atomu.

Ani Rutherfordův model neobstál jak po stránce experimentální, tak po stránce teoretické. Proto v roce 1913 předložil dánský fyzik Niels Bohr svůj model atomu, který s malými opravami „sloužil“ poměrně dlouhou dobu, i když některé jeho nedostatky bylo třeba odstranit postulováním. Podle Bohrova modelu, který výborně vysvětluje zejména optické vlastnosti (spektra) atomů, se elektrony pohybují po určitých kruhových drahách kolem kladného jádra, podobně jako se pohybují planety Sluneční soustavy kolem Slunce (podobnost je i v řádové velikosti: poloměr Slunce (poloměr jádra) / vzdálenost planet od Slunce (vzdálenost elektronů od jádra)) – viz Obr.2.3.



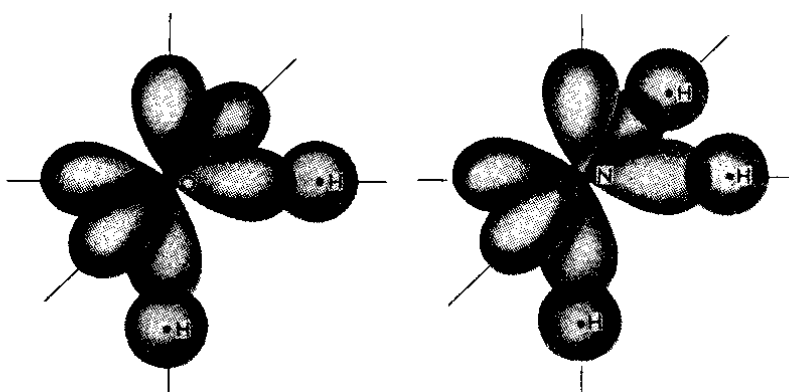
Obr.2.3. Bohrov model atomu.



Obr.2.4. Srovnání Bohrova (a) a kvantově – mechanického (b) modelu atomu.

Bohrův model atomu je posledním modelem, který lze alespoň zčásti vyložit tzv. „selským rozumem“, tj. lze si ho představit na základě klasické fyziky. Brzy po jeho vzniku bylo proti němu vzneseno několik vážných námitek, jak experimentálního, tak zejména teoretického rázu. Proto vznikl zatím poslední model atomu, využívající představ kvantové mechaniky (bohužel názorná představa tohoto modelu je již téměř nemožná). Podle tohoto modelu má elektron jak vlnový, tak i částicový charakter a jeho poloha v okolí jádra je dána pravděpodobnostní funkcí (Obr.2.4).

Přes všechny nedostatky Bohrova modelu je používán stále, i když známe jeho principiální nedostatky. Musíme však mít na paměti, že jednotlivé „dráhy“ elektronů nejsou ve skutečnosti dráhy v geometrickém slova smyslu, ale místa nejčastějšího výskytu elektronů. Hovoříme potom o tzv. „orbitalech“ (Obr.2.5a,b).



Obr.2.5 a) Valenční atomové orbity v H<sub>2</sub>O      b) Valenční atomové orbity v NH<sub>3</sub>

## 2.2. Vazebné síly v pevných látkách.

Vydeme – li z prosté experimentální zkušenosti, že pevné látky „drží pohromadě“ a přitom nejsou velmi husté, dojdeme k závěru, že mezi atomy v nich musí kromě *sil přitažlivých* existovat i síly opačné, tj. *síly odpudivé*. Na Obr.2.6a) je vynesena závislost obou druhů těchto sil, působících mezi dvěma atomy, na jejich vzájemné vzdálenosti a na Obr.2.6b) závislost jejich vzájemné potenciální energie přitažlivých a odpudivých sil opět na vzdálenosti. Z obrázků plyne, že atomy se vždy usadí v takové vzájemné vzdálenosti, aby byla výsledná potenciální energie jejich vzájemného působení minimální. Tato vzdálenost se nazývá *mřížková konstanta*.

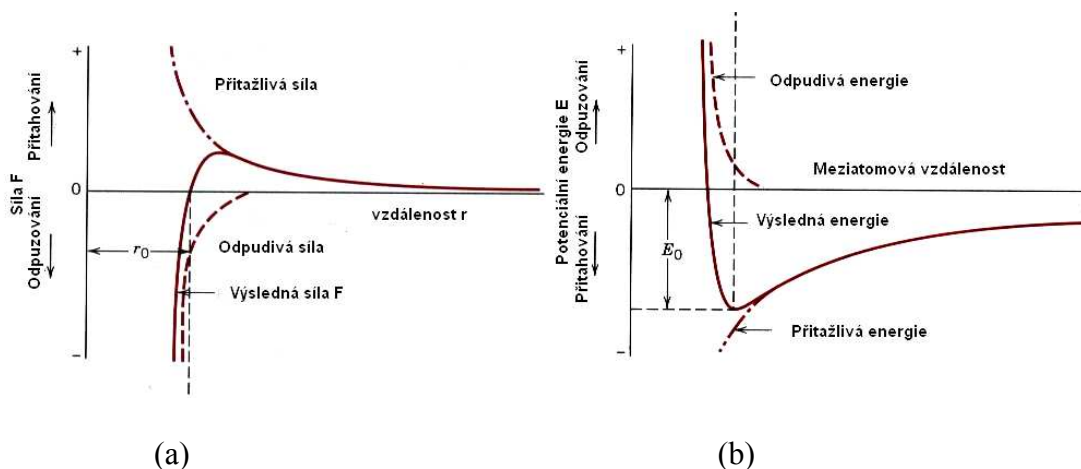
Dále stručně objasníme fyzikální podstatu meziatomových sil.

### 2.2.1. Van der Waalsovy síly.

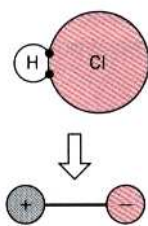
Van der Waalsovy přitažlivé síly působí mezi všemi atomy a molekulami. Protože je energie jejich vzájemného působení velmi malá (řádově 10 kJ/mol = 0,1 eV/atom), bývá většinou překryta jinou, silnější vazbou. V čistém stavu se s ní setkáváme u inertních plynů v kapalném a tuhém stavu a u některých dalších látek, o nichž se dále zmíníme.

Podstatou Van der Waalsových sil je vzájemné elektrické působení mezi dipóly, tj. protáhlými útvary, nesoucími dva stejně velké elektrické náboje opačného náboje na každém z obou konců (Obr.2.7). Podle konkrétního způsobu vytvoření těchto dipólů dělíme Van der Waalsovy síly na tři druhy:

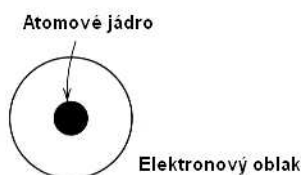




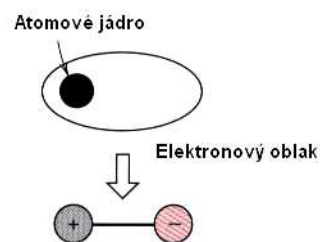
Obr.2.6. Závislost přitažlivých a odpuzivých sil (a) a vzájemné potenciální energie (b) dvou atomů na jejich vzájemné vzdálenosti.



Obr.2.7. Elektrický dipól.



Obr.2.8. Indukované Van der Waalsovy síly.



**a) Disperzní Van der Waalsovy síly.**

Atomy všech látek jsou obvykle elektricky neutrální, neboť elektrony jsou rozděleny symetricky kolem jádra. Všechny atomy však konají při teplotě větší než 0 K kmitavý pohyb, v jehož důsledku dojde ke vzniku okamžitých krátkodobých a chaotických (*disperzních*) narušení elektrické symetrie elektronového obalu, takže z neutrálních atomů vzniknou malé dipóly. Ty se mohou vzájemně orientovat tak, že se přitahují, nebo odpuzují. Podrobné výpočty ukazují, že v případě přitahování je celková energie systému nižší, než v případě odpuzování. Dojde tedy přednostně ke vzniku přitažlivých sil mezi dipóly a tím ke vzniku pevné látky (nebo kapaliny). Energie disperzních přitažlivých sil má krátký dosah a klesá se šestou mocninou vzdálenosti:

$$E_{disp} \approx \frac{1}{r^6} \tag{2.1}$$

### b) Indukované Van der Waalsovy síly.

Některé molekuly tvoří již samy od sebe tuhé dipóly (např. molekula HCl – viz Obr.2.8). Takové molekuly nazýváme *polárními molekulami*. Ty mohou indukovat dipóly v sousedních nepolárních molekulách nebo atomech, čímž opět vzniká mezi nimi vazba. Již z tohoto jednoduchého modelu plyne, že taková vazba bude silnější, než vazba disperzní. Podrobné výpočty však ukazují, že energie této vazby opět klesá se šestou mocninou vzdálenosti:

$$E_{ind} \approx \frac{1}{r^6} \quad (2.2)$$

### c) Van der Waalsovy síly mezi permanentními dipóly.

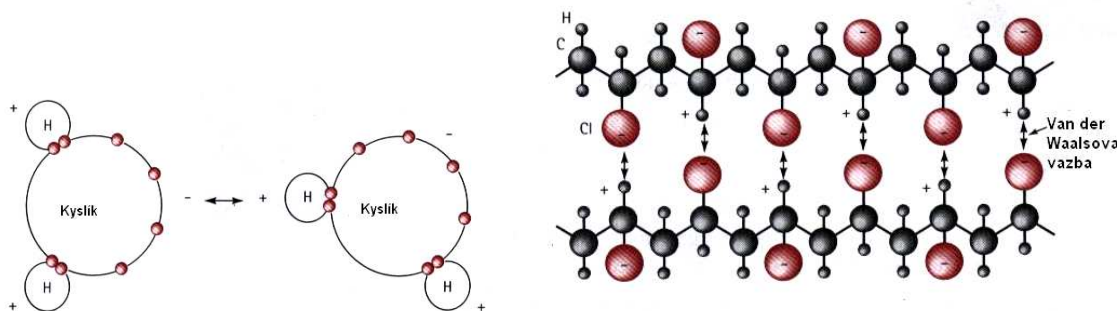
Pokud se látka skládá pouze z tuhých dipólů, potom mezi nimi existuje vazba ještě silnější, než vazba indukovaná (tzv. *orientační* Van der Waalsova vazba). Tu si můžeme představit tak, že např. záporný konec jedné molekuly je přitahován ke kladnému konci molekuly druhé, atd. Proto je tato vazba nejsilnější z Van der Waalsových vazeb. Její vazebná energie při nízkých teplotách klesá s třetí mocninou vzdálenosti

$$E_{or(n.t.)} \approx \frac{1}{r^3} \quad (2.3)$$

neboť uspořádané molekuly nejsou za nízkých teplot tak silně „rozhazovány“ tepelným pohybem. Za vyšších teplot energie orientačního vzájemného působení opět klesá se šestou mocninou vzdálenosti, jako je tomu u ostatních Van der Waalsových sil:

$$E_{or(v.t.)} \approx \frac{1}{r^6} \quad (2.4)$$

Van der Waalsova vazba je sice poměrně dosti slabá, ale má svůj velký význam, neboť se vyskytuje u všech látek (u většiny je však překryta některou ze silnějších vazeb). Na Obr. 2.9 jsou pro ilustraci uvedeny dva příklady výskytu této vazby.



Obr.2.9. Van der Waalsova vazba mezi atomy vody (a) a mezi řetězci polymeru (b)

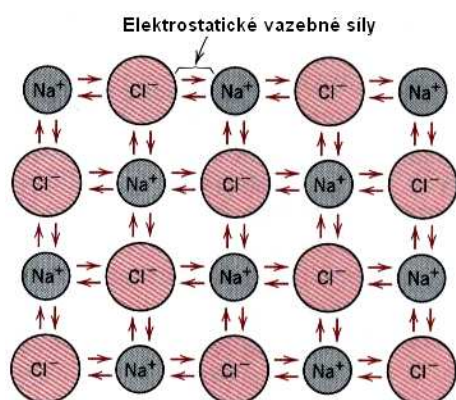
### 2.2.2. Iontová vazba.

Atomy alkalických kovů (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) jsou charakterizovány tím, že mají v poslední orbitě jediný valenční elektron, slabě vázaný k celému atomu. Naopak halogenům (F, Cl, Br, I, At) chybí v poslední orbitě jeden elektron k tomu, aby byla zcela zaplněna. Opustí – li tedy valenční elektron atom alkalického kovu a přejde do elektronového obalu halogenu, stane se z něho kladný iont. Naopak z halogenu se stane iont záporný, přičemž oba ionty mají elektronovou konfiguraci vzácných plynů (mají všechny orbity plně zaplněné elektrony). Výsledná vazba mezi oběma ionty je čistě elektrostatická (*iontová*) (Obr.2.9) a síly mezi nimi jsou dány Coulombovým zákonem

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} \quad (2.5)$$

( $e$  je náboj elektronu a  $\epsilon_0$  je dielektrická konstanta (permitivita) vakua)

Vazebná energie iontových krystalů je řádu  $10^3$  kJ / mol (5 eV / iont), tedy asi o dva řády vyšší, než energie Van der Waalsovy vazby.



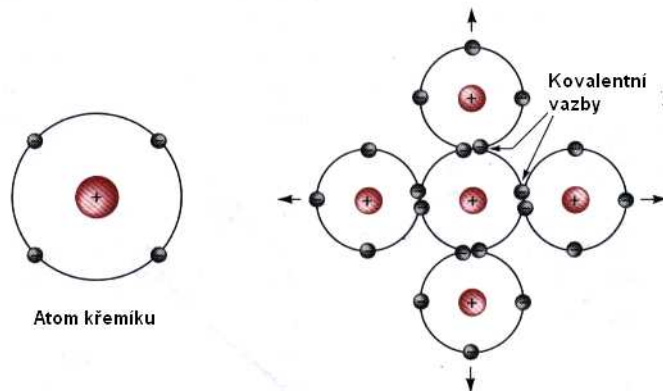
Obr.2.10. Iontová vazba (NaCl).

### 2.2.3 Kovalentní vazba.

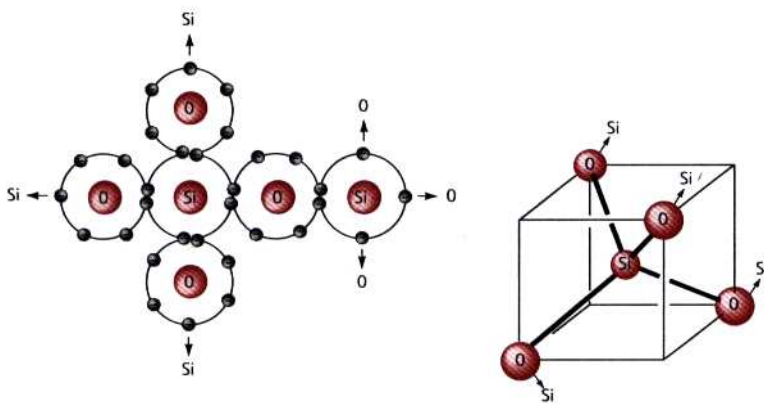
Podstatou *kovalentní vazby* je tzv. sdílení elektronů mezi sousedními atomy. Dva kovalentně vázané atomy přispívají každý nejméně jedním elektronem k vazbě a tyto elektrony jsou tedy „majetkem“ obou atomů. Kovalentní vazba mezi atomy křemíku je schematicky znázorněna na Obr.2.11. Její směrovost pak na Obr.2.12 (pro křemen  $\text{SiO}_2$ ).

Charakteristickou vlastností kovalentní vazby je již zmíněné *sdílení elektronů*, *směrovost* (kovalentní vazba se uskutečňuje pouze pod určitými úhly) a *nasyčenost* (daná mocenstvím vázaných atomů). Je třeba poznamenat, že k úplnému pochopení kovalentní vazby nestačí názorné představy klasické fyziky. Dokonale ji lze objasnit pomocí kvantové mechaniky.

Kovalentní vazba je v přírodě velmi rozšířená. Váží se jí atomy nekovových prvků samy se sebou v molekuly ( $\text{H}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_2$ , atd.), stejně jako mezi sebou ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$ , apod.). Patří sem ale rovněž diamant, krystaly křemíku a germania a slitiny typu GaAs, InSb, atd. Kovalentní vazba bývá velmi silná (diamant taje až při teplotě  $3550^\circ\text{C}$ ), ale také mnohem slabší (vismut taje již při  $270^\circ\text{C}$ ). Setkáme se s ní i při vzniku polymerů, kde umožňuje tvorbu dlouhých řetězců atomů a molekul.



Obr.2.11. Kovalentní vazba mezi atomy křemíku



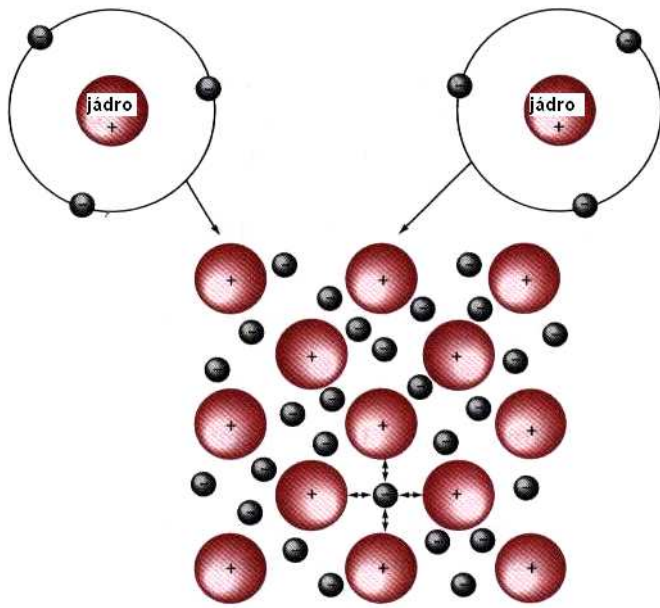
Obr.2.12. Směrnost kovalentní vazby mezi atomy v  $\text{SiO}_2$

### 2.2.4 Kovová vazba.

Atomy kovových prvků mají jeden, dva, nebo maximálně tři valenční elektrony. Model kovové vazby je velmi názorný a je založen na skutečnosti, že tyto elektrony, slabě k atomu vázané, nejsou vázány s žádným určitým atomem, ale jsou víceméně volné a pohybují se chaotickým pohybem v oblasti mezi kladnými ionty kovových atomů (které vznikly z neutrálních atomů poté, jak je elektrony opustily – viz Obr.2.13.).

Volné elektrony, nacházející se mezi kladnými ionty jednak odstiňují jejich elektrostatické odpudivé síly a zároveň působí jako „lepidlo“, které je váže dohromady.

Nastíněný mechanismus kovové vazby vysvětluje kvalitativně některé charakteristické vlastnosti kovů, jako je například velká tepelná a elektrická vodivost, apod. Vazebná energie kovové vazby může být jak poměrně nízká, např.  $68 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  ( $0,7 \text{ eV}$  / atom) pro Hg (bod tání  $-39^\circ\text{C}$ ), až po  $850 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  ( $8,8 \text{ eV}$  / atom) pro wolfram (bod tání  $3410^\circ\text{C}$ ).



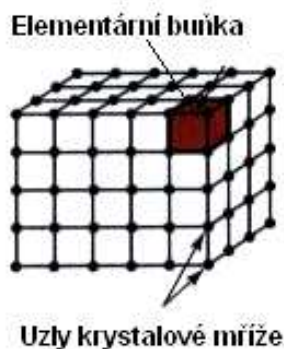
Obr.2.13. Schéma kovové vazby.

### 3. Struktura pevných látek.

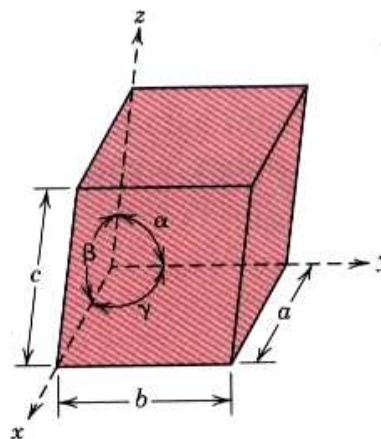
Většina vlastností pevných látek souvisí s jejich strukturou. Tyto vlastnosti (elektrické, mechanické, optické a magnetické) se často značně od sebe liší v závislosti na tom, zda se jedná o látku amorfni nebo krystalické a nebo i na tom, v jaké krystalografické soustavě látka krystalizují. Proto si v této kapitole shrneme to nejdůležitější, co se týká krystalické struktury pevných látek.

#### 3.1. Krystalografické soustavy.

Již v polovině 19. století se francouzský krystalograf A.Bravais zabýval otázkou, kolika různými způsoby lze v prostoru uspořádat atomy (modelované tuhými kuličkami) za podmínky, že okolí každého z nich je stejné. Zjistil, že to lze provést 14 způsoby. Pro každý z nich lze nalézt minimální prostorový útvar, jehož posouváním (translací) v prostoru získáme celý krystal (viz Obr.3.1). Takový základní motiv nazýváme *elementární buňkou*. Z geometrických úvah plyne, že elementární buňka obsahuje jeden atom (molekulu, kuličku, apod.). Některé z takových elementárních buněk si jsou geometricky podobné a tak můžeme 14 elementárních buněk sdružit do 7 krystalografických soustav. Soustavu krychlovou (kubickou), šesticévnou (hexagonální), trojklonnou (triklinickou), jednoklonnou (monoklinickou), kosočtverečnou (ortorombickou), čtverečnou (tetragonální) a trigonální, neboli klencovou (romboedrickou). Základní buňky těchto 7 soustav již nemusí obsahovat pouze jeden atom a proto jsou *složené*. Pokud obsahuje složená buňka atom uprostřed základny, nazýváme ji bazálně centrovanou, pokud jsou atomy uprostřed stěn, nazýváme ji plošně centrovanou (f.c.c.) a pokud je uprostřed buňky, jedná se o buňku prostorově centrovanou (b.c.c.) – zkratky mají původ ve zkrácených anglických názvech: „face-centered cubic“, „body-centered.cubic“.



Obr.3.1. Elementární buňka

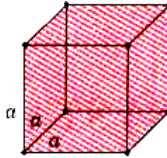
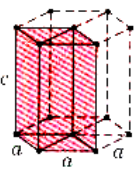
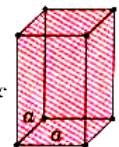

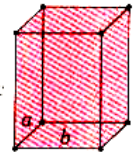
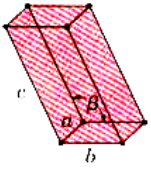
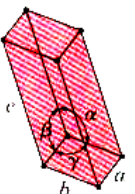


Obr.3.2. Parametry elementární buňky

Geometrie elementárních buněk je definována na základě skutečnosti, že máme k dispozici tři směry (x,y,z) (a na nich tři vzdálenosti mezi nejbližšími uzly, a, b a c – tzv. mřížkové konstanty) a tři úhly ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Všechny krystalografické soustavy a elementární i složené buňky lze potom charakterizovat různými hodnotami všech těchto šesti parametrů (viz Tab.3.1 a Obr.3.2.) .

Elementární buňky mají své významné body, směry a roviny souměrnosti. Podrobný popis prvků souměrnosti krystalů vychází za rámec této práce a čtenář se o něm může poučit ve speciální literatuře z oboru krystalografie.

Tab.3.1.

Soustava	Úseky na osách	Úhly	Elementární buňka
Kubická (krychlová) prostá, prostorově a plošně centrovaná.	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Šesterečná (hexagonální), prostá	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Čtverečná (tetragonální), prostá a prostorově centrovaná	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Trigonální - klencová (romboedrická), prostá	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Kosočtverečná (ortorombická), prostá, bazální, plošné i prostorově centrovaná.	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Jednoklonná (monoklinická), prostá a bazálně centrovaná	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Trojklonná (triklinická), prostá	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

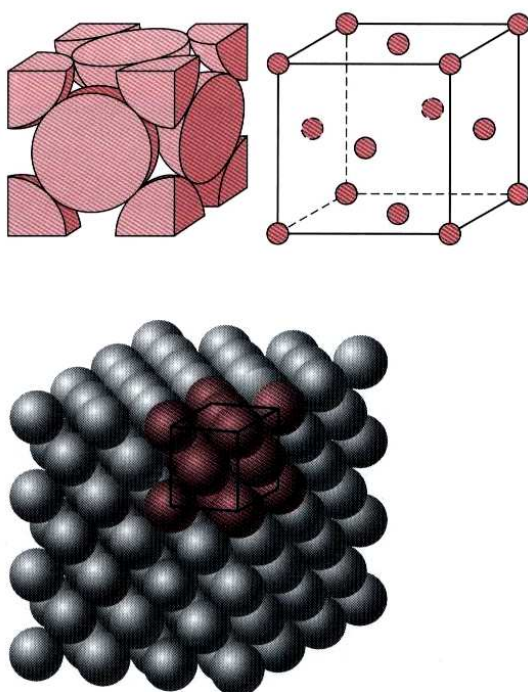


Dále si podrobněji všimneme soustavy kubické a hexagonální, neboť většina kovů krystalizuje právě v těchto soustavách. Prostá kubická soustava (Obr.3.1) se v přírodě nevyskytuje (zřejmě z důvodů energetických). Na Obr.3.3. je ukázána soustava kubická plošně centrovaná (f.c.c.), na Obr.3.4. soustava kubická prostorově centrovaná (b.c.c.) a na Obr.3.5. soustava hexagonální s těsným uspořádáním (h.c.p. = hexagonal close-packed).

Poznámka: pod pojmem *koordinační číslo* rozumíme počet nejbližších sousedů a pod pojmem *koeficient zaplnění* poměr

$$k = \frac{\text{celkový objem atomů v buňce}}{\text{celkový objem buňky}}$$

Jednoduchým výpočtem se dá přesvědčit o tom, že koeficient zaplnění pro f.c.c a h.c.p struktury je stejný a větší, než pro strukturu b.c.c a buňku kubickou prostou.

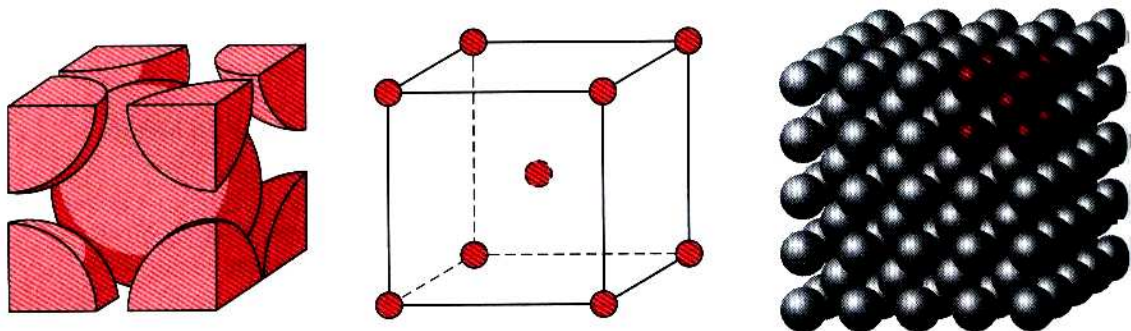


Obr. 3.3. Kubická plošně centrovaná soustava (f.c.c.)

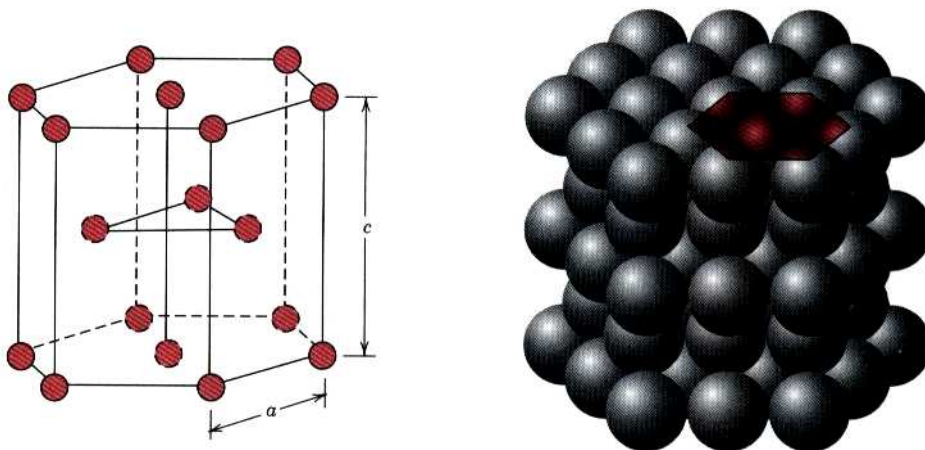
### **3.2. Směry a roviny v krystalech.**

Již z pouhého kvalitativního popisu struktury krystalů plyne, že nejsou izotropní, tj. že mají v různých směrech různé vlastnosti (už třeba jenom proto, že v různých směrech jsou atomy od sebe vzdáleny o různou vzdálenost). Proto je důležité orientovat se v krystalech a umět popisovat přesně směry a roviny v nich.





Obr.3.4. Kubická prostorově centrovaná soustava (b.c.c).



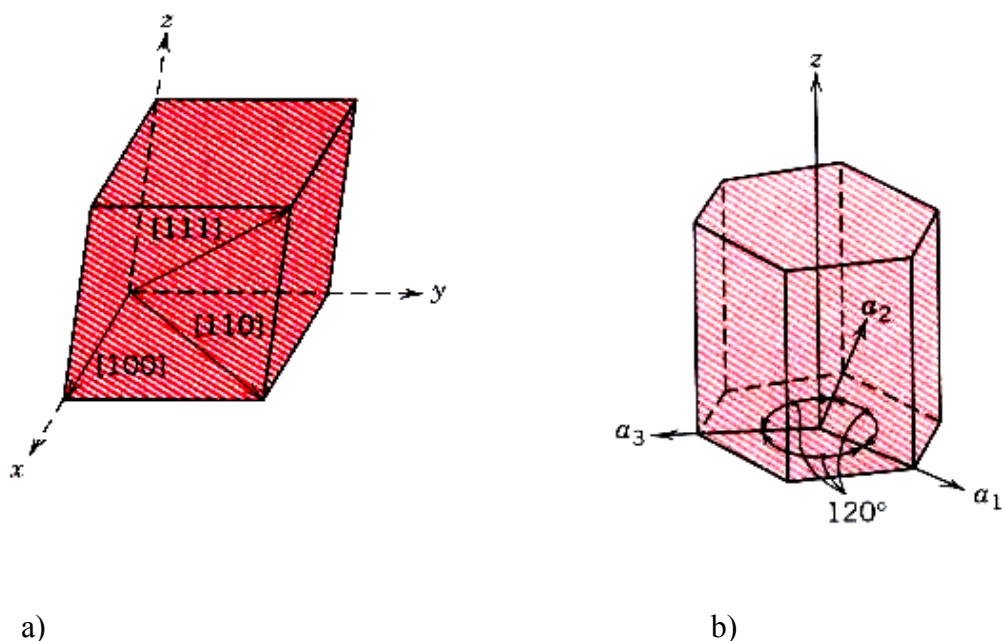
Obr.3.5. Soustava hexagonální s těsným uspořádáním (h.c.p.)

### 3.2.1. Krystalografické směry.

Směry v krystalech (tj. v elementární buňce, umístěné v pravoúhlé soustavě souřadnic, popisujeme pomocí vektoru, který má tyto vlastnosti:

- Má počátek v počátku soustavy souřadnic a končí v jednom z uzlů elementární buňky.
- Průměty vektoru do jednotlivých os soustavy souřadnic jsou rovny celistvému násobku rozměrů elementární buňky  $a, b, c$ .
- Tato tři čísla upravíme společným dělitelem tak, aby byla nejmenší.
- Získaná tři čísla zapíšeme do hranatých závorek  $[m\ n\ p]$ . Pokud je některé z nich záporné, napíšeme znaménko minus nad toto číslo., např.  $[1\ \bar{1}\ 1]$ .

V důsledku libovolné volby počátku soustavy souřadnic jsou směry  $[1\ 0\ 0]$ ,  $[\bar{1}\ 0\ 0]$ ,  $[0\ 1\ 0]$ , atd. totožné, takže tvoří skupinu, kterou označíme lomenými závorkami a jako reprezentanta skupiny vybereme libovolného zástupce, např.  $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$  a zapíšeme ho do lomených závorek. (Obr. 3.6 a).



Obr.3.6. Krystalografické směry v kubické a hexagonální soustavě.

V krystalech s hexagonální strukturou se volí tzv. Millerova – Bravaisova soustava souřadnic s osami  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  a  $z$  (Obr.3.6 b). Směry v hexagonálních krystalech jsou pak dány čtyřmi souřadnicemi  $[m n s p]$ , z nichž první tři jsou závislé, jak plyne z obrázku a platí pro ně vztah  $s = -(m + n)$ .

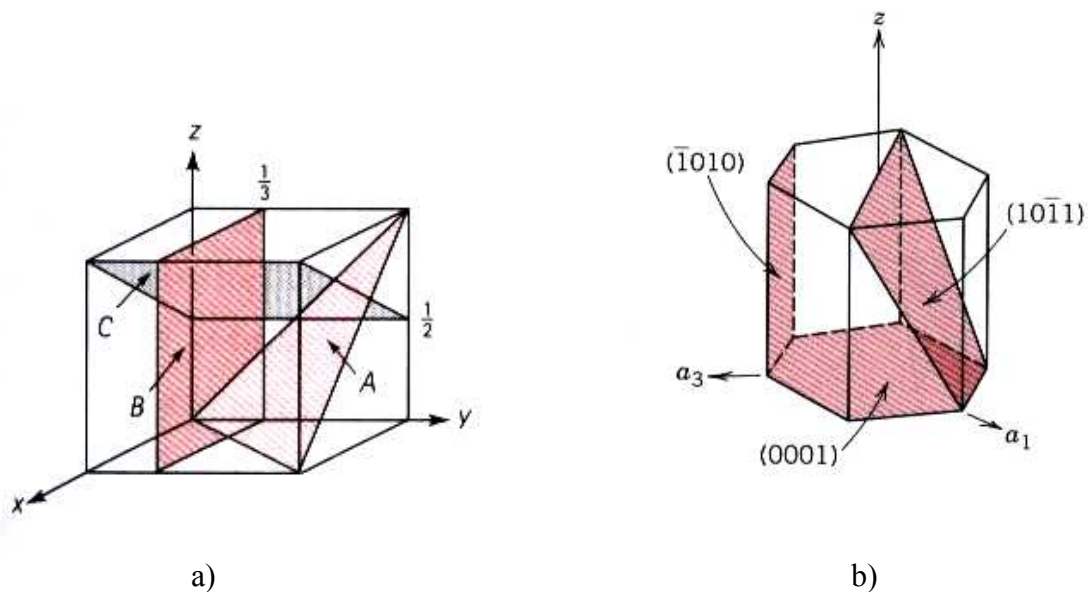
### 3.2.2. Krystalografické roviny.

Roviny v krystalech popisujeme pomocí tzv. Millerových indexů  $(h k l)$ . Přitom volba souřadnic je stejná, jako při určování směrů. Indexy  $h$ ,  $k$ ,  $l$  určíme následujícím způsobem:

- Úseky, které vytíná vybraná rovina na jednotlivých osách vyjádříme pomocí mřížkových parametrů  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (pro roviny, rovnoběžné s některou stěnou buňky je takový úsek  $\rightarrow \infty$ ).
- Vyjádříme převrácené hodnoty těchto úseků (pro roviny, rovnoběžné s rovinami  $xy$ ,  $xz$  a  $zy$  je to 0).
- Tato tři čísla převedeme na nejmenšího společného jmenovatele.
- Čitatele potom zapíšeme jako Millerovy indexy dané roviny  $(h k l)$ .

Podobně jako u směrů, lze i v případě rovin říci, že existují skupiny rovin, které jsou identické co se týká fyzikálních vlastností (např. roviny  $(1\bar{1}1)$ ,  $(\bar{1}11)$ ,  $(111)$  atd.). Zástupce takových rovin pak napíšeme do složených závorek, např.  $\{111\}$  (Obr. 3.7.a).

V případě hexagonálních krystalů použijeme stejně jako v případě směrů Millerovu – Bravaisovu soustavu souřadnic a Millerovy indexy rovin budou mít čtyři čísla  $(h k i l)$ , z nichž první tři jsou závislá a platí mezi nimi vztah  $i = -(h + k)$  (viz Obr. 3.7 b).

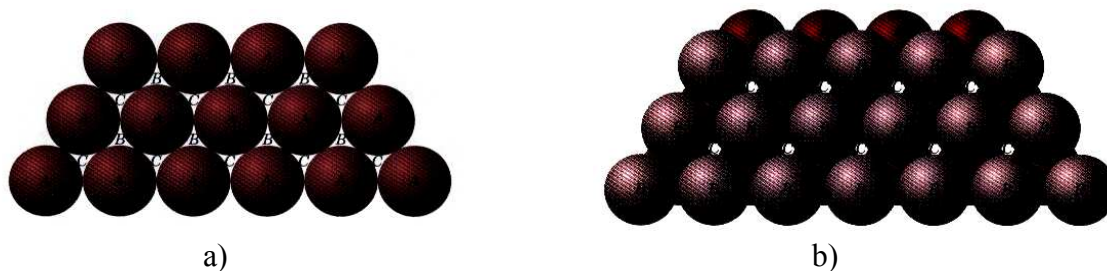


Obr.3.7. Krystalografické roviny ve struktuře kubické a) a hexagonální b).

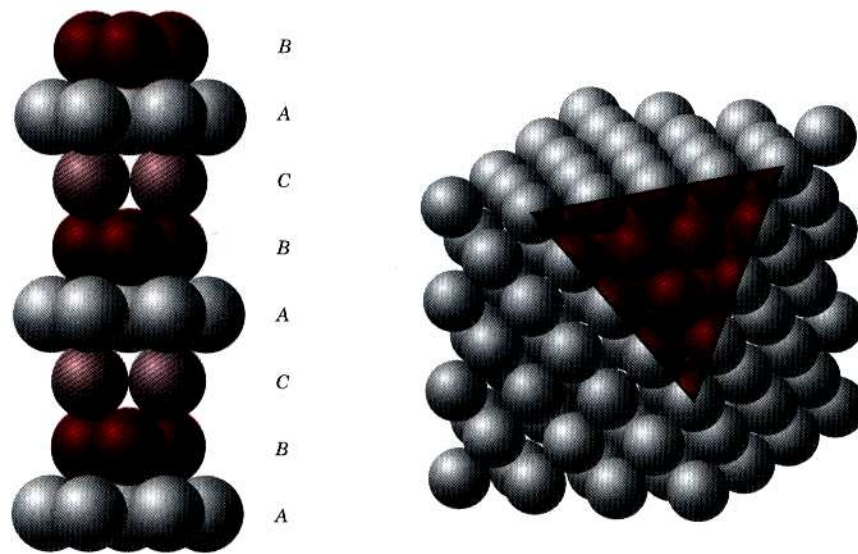
### 3.3. Krystaly s nejtěsnějším uspořádání atomů.

Již jsme uvedli, že krystaly s f.c.c a h.c.p strukturou mají nejvyšší koeficient zaplnění. V obou případech se jedná o tzv. *strukтуры s nejtěsnějším uspořádáním*. Jinými slovy, chceme – li uspořádat tuhé kuličky (atomy) tak, aby se jich do daného objemu vešlo co nejvíce, musíme to udělat jedním, nebo druhým způsobem (f.c.c , nebo h.c.p ). V praxi to znamená, že např. na rovinu stolu poskládáme tuhé kuličky podle Obr. 3.8. a). Na ně poskládáme do jamek, označených písmeny B další vrstvu kuliček (Obr. 3.8.b)). Třetí vrstvu můžeme buď umístit do míst C (a tím vznikne struktura f.c.c), nebo nad původní vrstvu A (tím vznikne struktura h.c.p). Pro strukturu f.c.c tedy platí střídání rovin ABCABCABC...(Viz Obr.3.9). a pro strukturu h.c.p střídání ABABABAB.....(viz Obr.3.10)

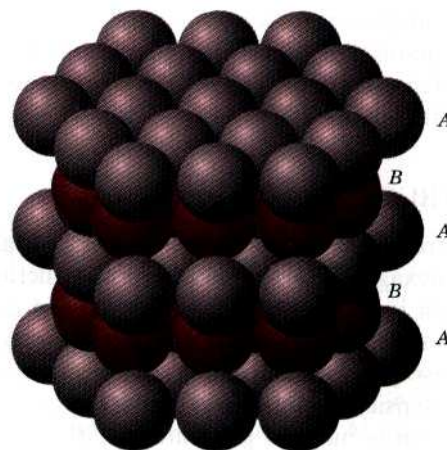
Poznámka: naruší-li se pořadí rovin, např. ABABCABAB ....., nebo ABCABABCABC ....., hovoříme o *vrstvené chybě* v daném místě krystalu (koeficient zaplnění se samozřejmě nezmění).



Obr. 3.8. Ilustrace vzniku nejtěsnějšího uspořádání.



Obr.3.9. Kubická plošně centrovaná struktura (nejtěsnější uspořádání)



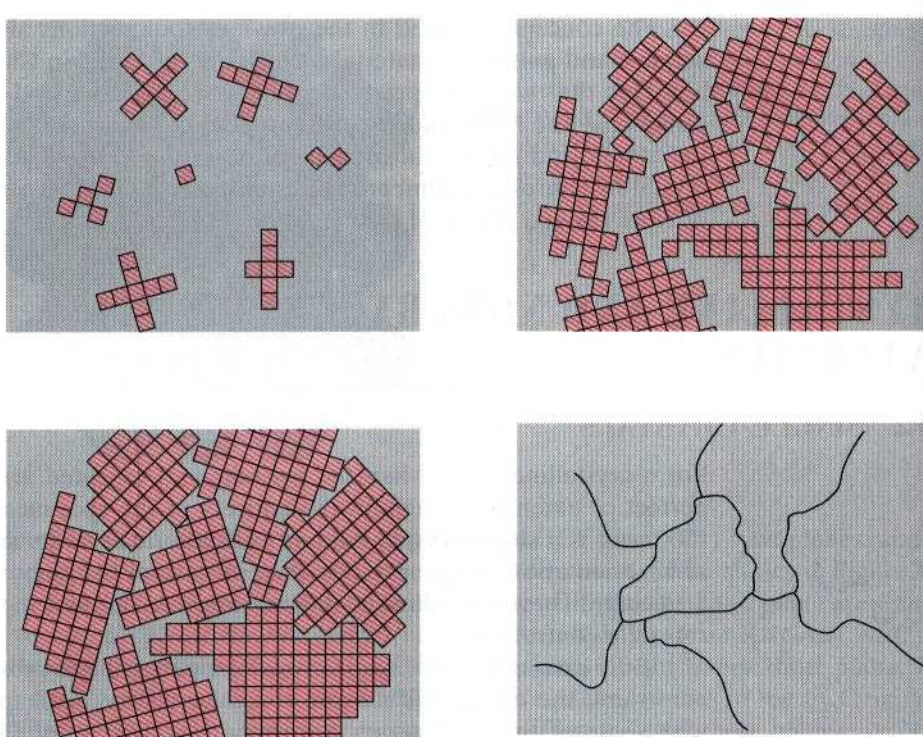
Obr.3.10. Mřížka hexagonální s nejtěsnějším uspořádáním



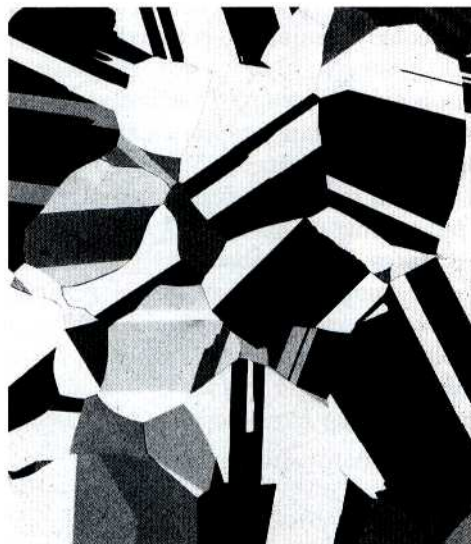
### **3.4. Polykrystalické materiály, anizotropie, amorfní látky.**

Pokud se elementární buňka opakuje translačně v celém objemu, hovoříme o *monokrystalu*. Pouze některé látky se však v přírodě vyskytují ve formě monokrystalů (např. diamant a další drahé kameny, oxid křemičitý apod.). Většina ostatních látek (zejména kovy) krystalizuje ve formě *polykrystalů*, tj. konglomerátů, složených z drobných monokrystalků (tzv. *zrn*), oddělených od sebe *hranicemi zrn* (Obr.3.11). (Důvodem je zřejmě skutečnost, že polykrystalové mají ve srovnání s monokrystalami nižší energii a vyšší entropii). Na Obr.3.12 pak je uvedena polykrystalická struktura oceli, získaná leštěním a následným leptáním vzorku. Pozorováno v optickém mikroskopu.

Významnou vlastností monokrystalů je tzv. *anizotropie* fyzikálních vlastností, tj. často značně se lišící vlastnosti v různých směrech (např. modul pružnosti, optické a elektrické vlastnosti, apod.). U polykrystalů je anizotropie potlačena tím, že zrna mají různou orientaci. Přesto i u nich se může objevit anizotropie, způsobená tím, že polykrystalové jsou zpravidla během výroby deformovány (válcovány, protlačovány) v jednom směru a zrna pak mají v tomto směru protáhlejší tvar – tzv. *texturu*. Potom i u polykrystalů pozorujeme anizotropii fyzikálních vlastností, závislou na směru textury.



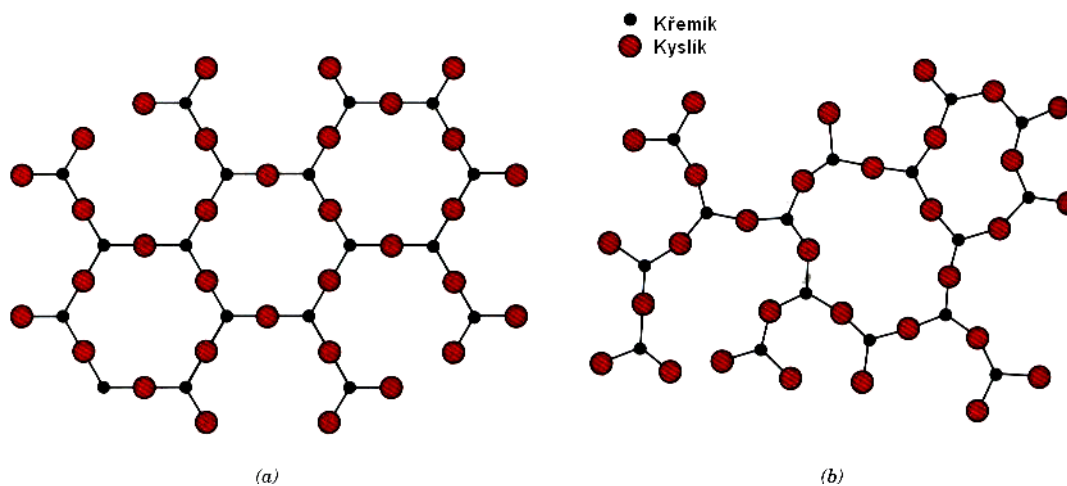
Obr.3.11. Vznik polykrystalů (tuhnutím)



Obr.3.12. Polykrystalická struktura (ocel)

**Amorfni látky.**

Kromě krystalických a polykrystalických látek se v přírodě vyskytují i *látky amorfni*, tj. takové, které nemají žádné významné uspořádání. Patří sem např. sklo, asfalt, vosk, apod., tj. látky, které svojí strukturou připomínají spíše kapaliny. Proto je někdy též nazýváme přechlazenými kapalinami (skutečně pozorujeme, že pomalu tečou – například asfalt a dokonce i sklo, i když velice pomalu). Jako příklad uvádíme na Obr. 3.13 a) a b) strukturu amorfniho a krystalického SiO<sub>2</sub>.



Obr.3.13. Struktura krystalického a) a amorfniho SiO<sub>2</sub>

Krystalická struktura látek byla potvrzena a je stále zkoumána zejména pomocí difrakčních metod. Podrobněji je popíšeme ve zvláštní kapitole, neboť se jedná o velmi rozsáhlou a důležitou oblast experimentální fyziky.

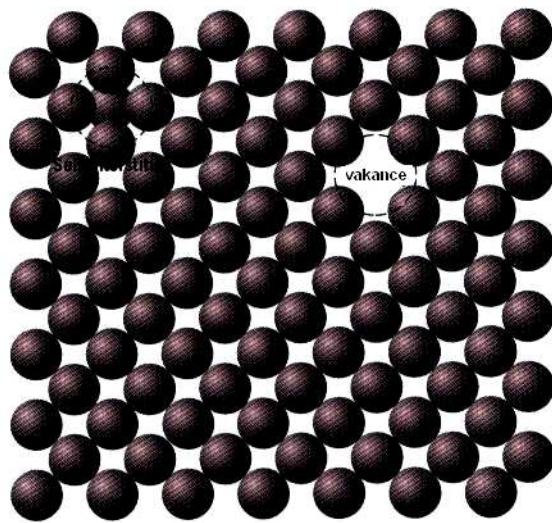
## **4. Poruchy krystalové mříže.**

Až do 30. let minulého století nepovažovali vědci za důležité zabývat se otázkou, jaký vliv mají např. cizí atomy (příměsi a nečistoty), nebo i jiné poruchy na vlastnosti pevných látek. Teprve výrazný pokrok v metodách, umožňujících výrobu velmi čistých materiálů, se stal podnětem pro studium tohoto problému a přinesl a stále přináší velmi výrazné technologické aplikace (od slitin kovů s požadovanými mechanickými vlastnostmi až po miniaturní elektronické součástky).

Poruchy krystalové mříže lze rozdělit podle různých hledisek. Z nich nejpřirozenější se zdá rozdělení podle dimenze, tj. na *poruchy bodové* (bezrozměrné), *čárové* (jednorozměrné), *plošné* (dvojměrné) a *objemové* (trojměrné).

### **4.1. Bodové poruchy.**

Krystalovou mřížku je třeba chápat jako dynamický útvar. Mezi jednotlivými atomy působí síly přitažlivé a odpuzivé (které si lze představit jako malé pružinky) a při jakékoliv teplotě  $T > 0$  K konají atomy kmity, jejichž amplituda roste s teplotou. Potom je jistě názornou představa, že některý z atomů může náhodně získat od svých sousedů tolik energie, že zpřetrhá své vazby s nimi a usadí se buď na povrchu krystalu (Schottkyho mechanismus), nebo uvnitř krystalu v místě, kde se žádný atom nenachází (meziuzlová, *intersticiální* poloha, Frenkelův mechanismus). Prázdné místo v krystalové mřížce se nazývá *vakance* (Obr.4.1).



Obr.4.1. Vakance (Frenkelův mechanismus)

#### **4.1.1. Vlastnosti vakancí.**

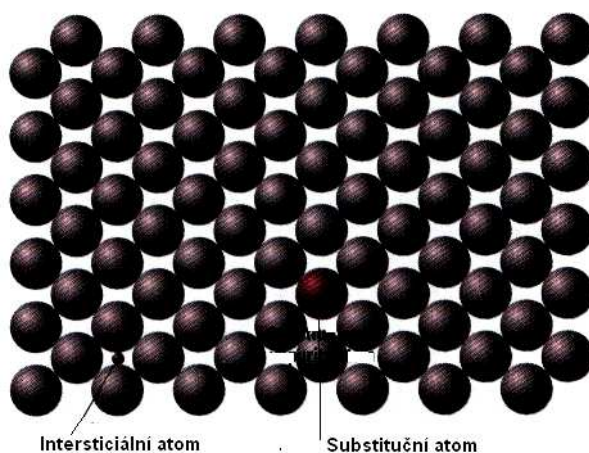
Výpočty, založené na termodynamických principech ukazují, že při každé teplotě, větší než 0 K je v krystalu přítomen jistý počet vakancí (tzv. *rovnovážná koncentrace vakancí*) a ten roste s teplotou exponenciálně. Jinými slovy, nelze nijakým způsobem vyrobit krystal bez vakancí (při  $T > 0$  K).

Vakance se mohou v krystalu pohybovat (tzv. *migrace* vakancí) a to tím snadněji, čím je vyšší teplota krystalu. Energie jednotlivé vakance (monovakance) je v absolutní hodnotě velmi malá a proto ji vyjadřujeme pomocí vedlejší jednotky v soustavě SI, v tzv. elektronvoltech eV (elektronvolt je energie, kterou získá elektron průchodem potenciálovým rozdílem 1 V.  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Z energetického hlediska je pro vakance výhodné spojit se ve větší celky např. *divakance* (dvě vakance), *trivakance*, atd. Spojování ve větší celky (trivakance a více) však brání entropický princip, tj. snaha po co největší neuspořádanosti. Koncentrace divakancí je úměrná koncentraci vakancí a většinou je menší, než 10 % z celkové koncentrace vakancí. Divakance jsou z pochopitelných důvodů pohyblivější, než monovakance.

#### 4.1.2. Příměsi v pevných látkách.

Dokonale čistý krystal (např. kovu), skládající se pouze z jednoho druhu atomů, nelze vyrobit. I velice čistý materiál (99,9999 %) obsahuje v  $1 \text{ m}^3$  asi  $10^{23}$  atomů nečistot (pokud jsou cizí atomy nežádoucí, nazýváme je *nečistotami*, v opačném případě *příměsemi*) Atom příměsi se může v krystalu nacházet buď v substituční, nebo intersticiální poloze (Obr.4.2). Podle toho hovoříme o slitině substituční, nebo intersticiální (*substituční*, nebo *intersticiální tuhý roztok*). Teorie slitin vysvětluje, proč jsou některé atomy příměsi dobře a jiné málo rozpustné v daném krystalu. Hlavními faktory, které ovlivňují rozpustnost atomů, jsou:

- Atomový rozměrový faktor.* Pokud se liší atomové poloměry rozpouštědla a rozpouštěných atomů o méně než 15 %, je rozpustnost obvykle dobrá.
- Krystalová struktura.* Pro dobrou rozpustnost dvou látek je potřebná stejná krystalová struktura.
- Elektronegativita.* Čím je jeden prvek více elektronegativní a druhý elektropozitivní, tím menší je pravděpodobnost vzniku substitučního tuhého roztoku.
- Mocenství.* V kovu s určitým mocenstvím se snadněji rozpouští kov s vyšším mocenstvím, než s mocenstvím nižším.



Obr.4.2. Atomy příměsí v krystalu.

Složení tuhého roztoku udáváme buď ve váhových procentech (wt. %), nebo v atomových procentech (at. %). Váhová procenta vypočítáme jako poměr hmotnosti příměsí k celkové hmotnosti slitiny a atomová procenta jako počet molů příměsí k celkovému počtu molů prvků ve slitině.



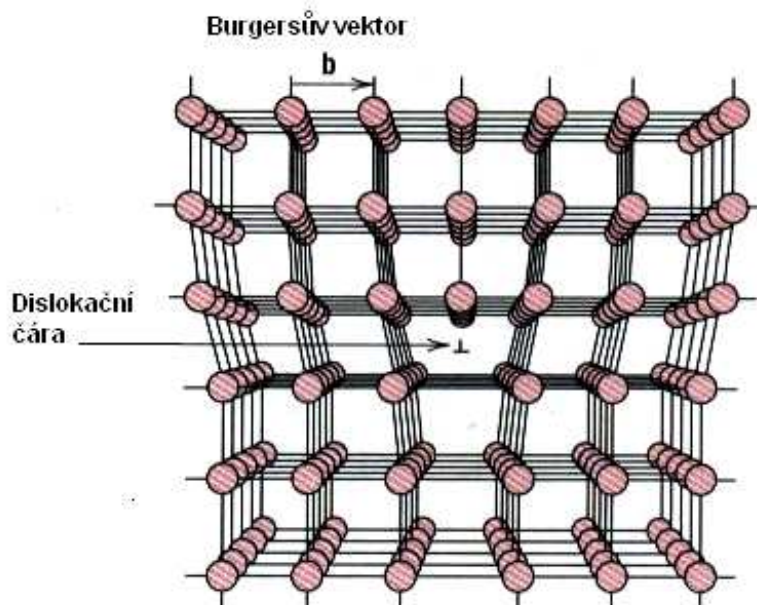
## 4.2. Čárové poruchy.

Čárová porucha, zvaná dislokace má velmi zajímavou historii. Na základě nepříliš složité teorie vypočetl Frenkel velikost tzv. *kritického skluzového napětí*, tj. napětí, potřebného pro vznik plastické deformace kovů. Bylo však zjištěno, že tato teoretická hodnota je o několik řádů vyšší, než hodnota, získaná experimentálně. Proto byla navržena nejdříve jako modelová představa porucha, nazvaná dislokace, která měla zjištěný velký rozdíl vysvětlit. Byla vytvořena složitá a matematicky náročná teorie dislokací a teprve po více než 10 letech byla bezpečně potvrzena experimentálně. Je třeba poznamenat, že všechny experimentálně zjištěné vlastnosti dislokací se velmi přesně shodovaly s teoretickým modelem. To lze chápat jako jedno z velkých (ale málo známých) vítězství exaktní vědy – fyziky.

Dislokace vznikají vždy, když v krystalu působí mechanické napětí (při tuhnutí, při plastické deformaci). Dislokace není rovnovážnou poruchou jakou je vakance a tak lze i při teplotách vyšších, než 0 K vyrobit krystal bez dislokací (i když je to náročné). Existují dva základní druhy dislokací, *dislokace hranová* a *dislokace šroubová*. Dislokace, která má vlastnosti obou, se nazývá *dislokace smíšená*. Dislokace je z atomového hlediska „obrovským“ útvarem, neboť začíná a končí na stěnách krystalu, nebo se váže sama na sebe (tvoří smyčku) a obsahuje tedy nepředstavitelné množství atomů.

### 4.2.1. Dislokace hranová.

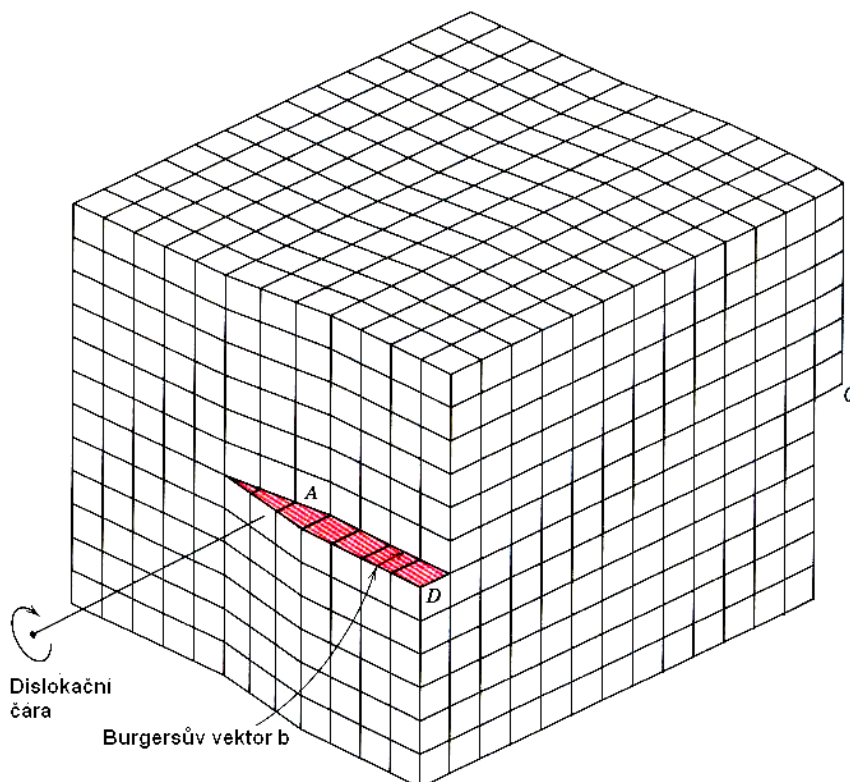
Na Obr. 4.3 je schematicky znázorněna hranová dislokace. V obrázku je zakreslen tzv. *Burgersův vektor*  $\mathbf{b}$ , který zkonstruujeme tak, že kolem dislokace vytvoříme *Burgersovu smyčku*, skládající se ze stejného počtu kroků doprava jako doleva a nahoru jako dolů. Volný vektor  $\mathbf{b}$ , který smyčku uzavírá, je kolmý na dislokační čáru (hranu nadbytečné poloroviny) a vytváří s ní tzv. *skluzovou rovinu*, v níž se hranová dislokace pohybuje. Pohyb dislokace je velmi „úsporný“, probíhá tak, že v důsledku kmitů mříže se naruší vazby v okolí dislokace a ta se posune o jednu meziatomovou vzdálenost (úspornost pohybu dislokace je důvodem, proč je experimentální kritické skluzové napětí mnohokrát nižší, než vypočtené – Frenkelův model vycházel z předpokladu posuvu části krystalu nad skluzovou rovinou vůči části pod ní jako celek, tedy předpokládal narušení obrovského počtu vazeb najednou).



Obr.4.3. Hranová dislokace

### 4.2.2. Dislokace šroubová.

Šroubová dislokace ( Obr.4.4) vznikne tak, že rozříznutý krystal podrobíme stříhové deformaci. Burgersův vektor této dislokace je rovnoběžný s dislokační čarou a existuje tedy velký počet skluzových rovin, v nichž se dislokace může pohybovat (dislokační čára je osou svazku všech těchto skluzových rovin).



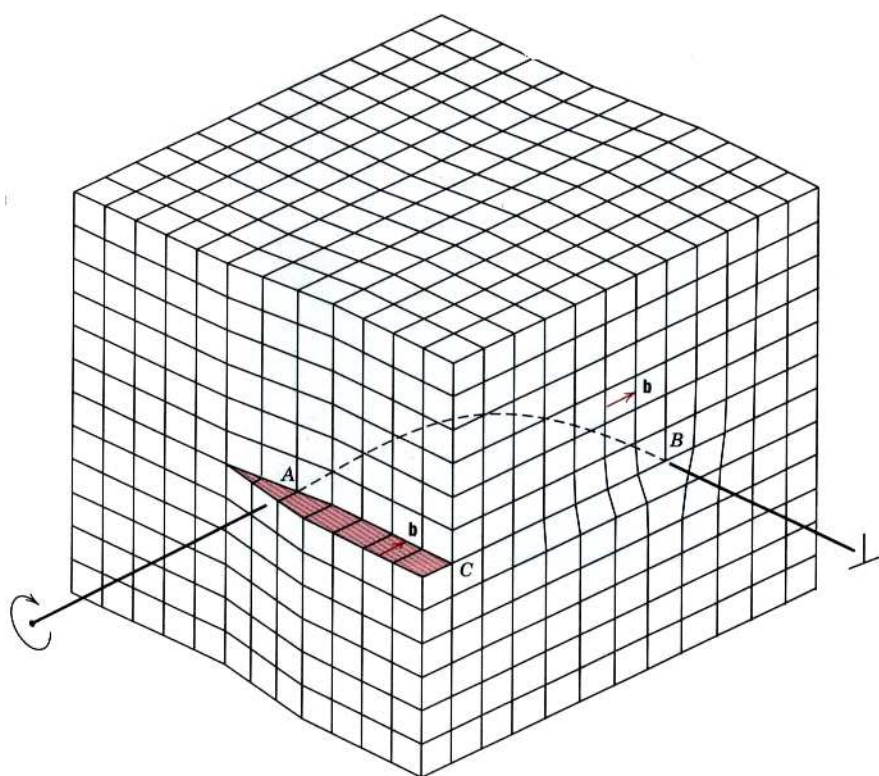
Obr.4.4. Šroubová dislokace.

Na Obr. 4.5. je znázorněna smíšená dislokace jako nejobecnější druh dislokace, obsahující v sobě jako krajní případy dislokaci hranovou a šroubovou.

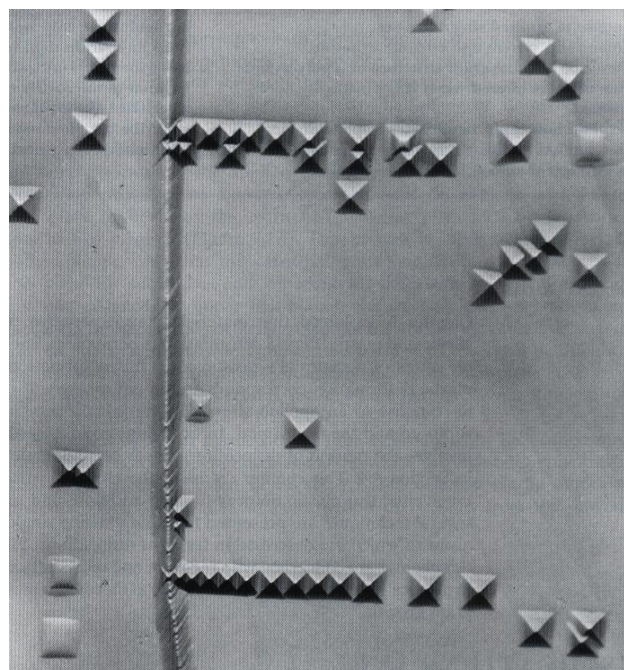
### 4.2.3. Důkazy existence dislokací.

#### a) Leptové důlky.

Z Obr.4.3 plyne, že v místě, kde hranová dislokace (ale totéž platí i pro dislokaci šroubovou) vychází na povrch krystalu, se nachází atom s volnou vazbou a navíc je tam jiná hodnota povrchové energie, než má volný povrch. Ve speciálně vybraném leptadle pak dojde k přednostnímu naleptání okolí dislokace a v optickém mikroskopu můžeme po omytí a osušení povrchu pozorovat leptové důlky (Obr. 4.6).



Obr.4.5. Smíšená dislokace se svými krajními případy, dislokací hranovou a šroubovou..

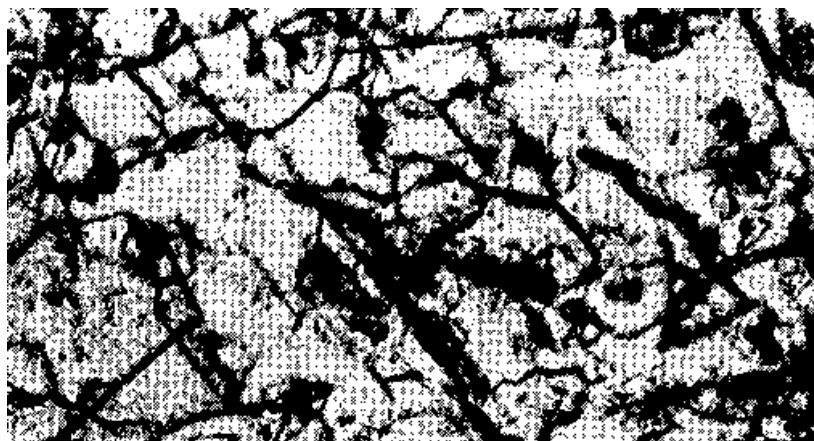


Obr.4.6. Leptové důlky (monokrystal NaCl).



b) Rentgenová a transmisní elektronová difrakce.

Okolí dislokace lze chápat jako narušení periodicity krystalových rovin. Proto ozáříme-li takové místo rentgenovými paprsky, budeme pozorovat narušení původně pravidelného difrakčního obrazu (Obr.4.7.). Podobně je tomu i v případě, že ozáříme tenkou kovovou fólii (s dislokacemi) paprskem elektronů. Dojde k difrakci elektronů na dislokacích a výsledek se opět projeví na transmisní elektronové mikrofotografii (Obr.4.8). Blíže si obou experimentálních metod všimneme ve zvláštní kapitole.



Obr.4.7. Rentgenová topografie podle Langa (tenká hliníková fólie)



Obr.4.8. Elektronová transmisní mikrofotografie (titan).

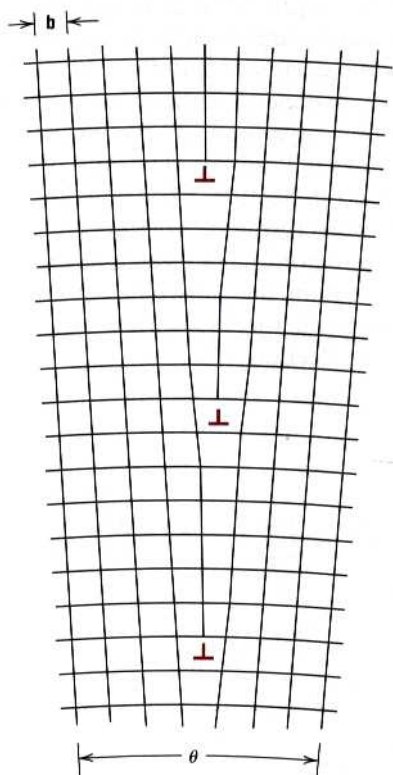
### 4.3. Plošné poruchy.

#### 4.3.1. Povrch krystalu.

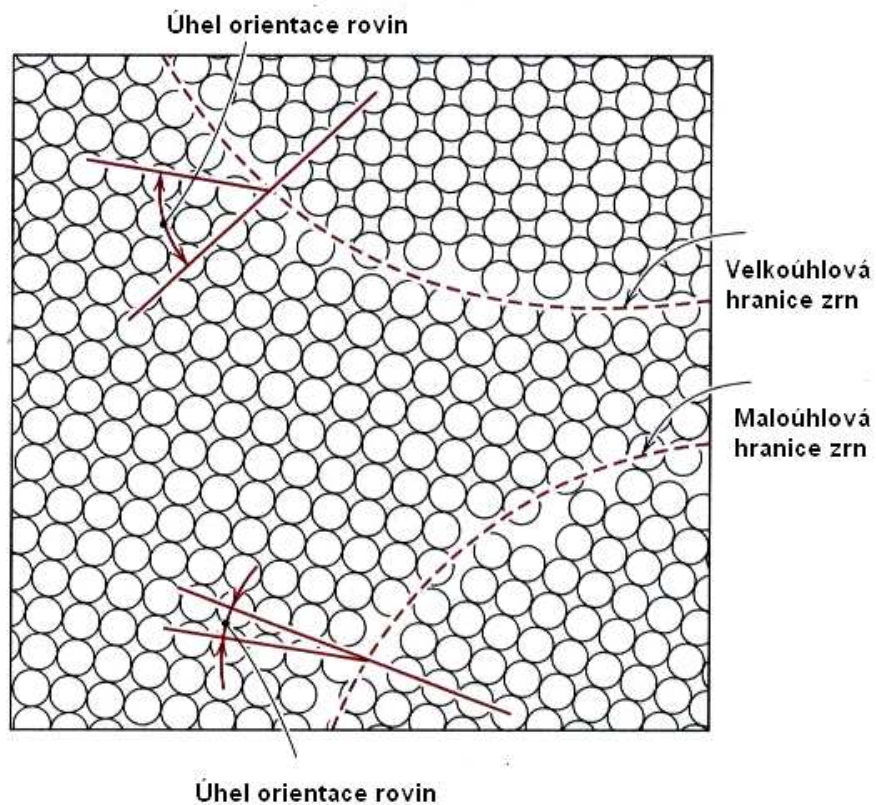
Na atom, nacházející se uvnitř pevné látky působí všechny okolní atomy stejnou silou, takže výslednice sil, které na něj působí bude nulová. Jinak tomu je na povrchu krystalu, tam je výslednice sil od okolních atomů nenulová a působí směrem dovnitř krystalu (je to obdoba pojmu „povrchové napětí kapalin“, kterému bude věnována zvláštní kapitola). Jinými slovy, povrch krystalu má oproti vnitřku krystalu navíc tzv. *povrchovou energii* a proto jej lze pokládat za zvláštní druh poruchy.

#### 4.3.2. Hranice zrn.

Již jsme se zmínili o tom, že oblast mezi zrny v polykrystalech se nazývá hranice zrn. Posláním této hranice je nějakým způsobem zajistit přechod od jednoho zrna (a v něm orientovaných krystalových rovin) k zrně druhému (s jinak orientovanými krystalovými rovinami). Hranice zrn dělíme na *maloúhlové* a *velkoúhlové*. Maloúhlová hranice je zobrazena na Obr. 4.9. Vidíme, že je tvořena řadou hranových dislokací. Velkoúhlová hranice zrn je složitější a je uvedena na Obr.4.10.



Obr.4.9. Maloúhlová hranice zrn



Obr.4.10. Porovnání malouhlové a velkoúhlové hranice zrn v krystalu.

#### **4.4. Objemové poruchy.**

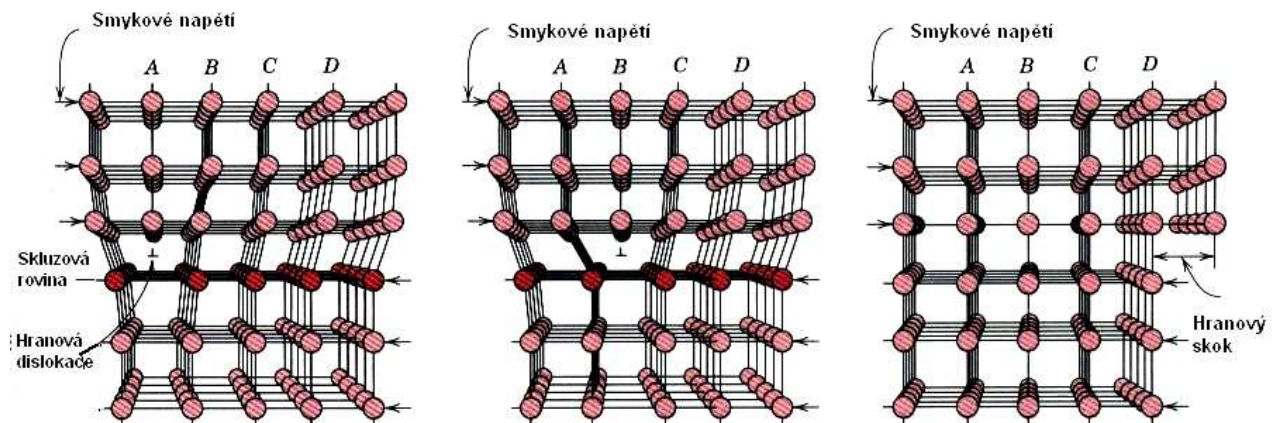
Mezi objemové poruchy řadíme trhliny a částice jiné fáze (precipitáty), přítomné v krystalu. Zmíníme se o nich podrobně později.

## 5. Zpevnění materiálu.

V předcházejících kapitolách jsme se seznámili se strukturou, meziatomovými silami a poruchami krystalové mřížky pevných látek. Mechanické vlastnosti pevných látek ( a zejména kovů) jsou nejvíce ovlivňovány dislokacemi. Zjednodušeně se dá říci, že v oblasti pružné se dislokace ještě nepohybují a teprve od okamžiku, kdy napětí, působící na dislokaci překročí jistou mez a dislokace se dají do pohybu, dá se hovořit o plastické deformaci. Protože pohyb dislokací je tak důležitý zejména pro charakterizování plastických vlastností látek , všimneme si nejprve podrobněji právě pohybu dislokací.

### 5.1. Pohyb dislokací.

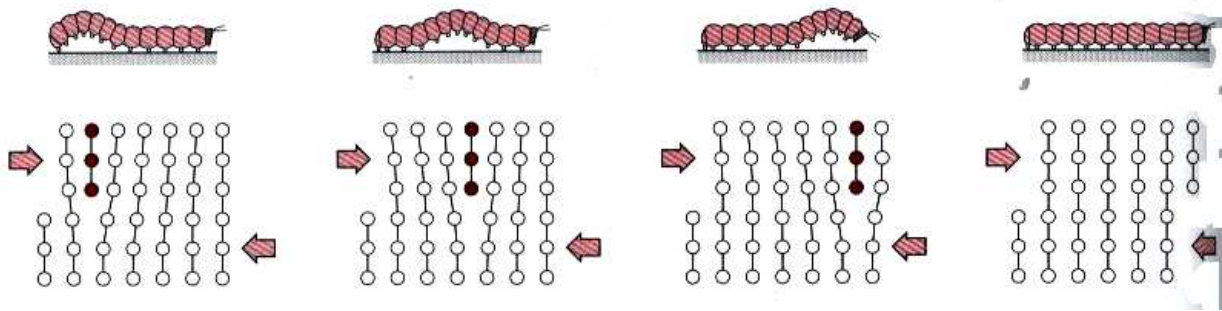
V odstavci 4.2. jsme podrobně popsali všechny tři typy dislokací a základní veličiny, které je charakterizují (Burgersův vektor, dislokační čáru a skluzovou rovinu). Znovu je třeba zdůraznit, že celá krystalová mřížka je útvarem dynamickým, tj. že všechny atomy mřížky kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Na Obr.5.1 je schematicky znázorněn pohyb hranové dislokace. Plyne odtud, že na pohybu dislokace se účastní pouze atomy v okolí hrany nadbytečné poloroviny. Kromě toho je důležité, že atomy této hrany mají volnou, nenasycenou vazbu. Atomy dislokace kmitají a mohou se navázat na atomy, nacházející se pod skluzovou rovinou, u nichž se při kmitání narušily vzájemné vazby. Nebude-li působit na dislokaci žádné napětí, bude dislokace kmitat kolem rovnovážné polohy. Působí-li však skluzové napětí např. ve směru zleva doprava, bude se dislokace pohybovat také tímto směrem a výsledkem bude skok o velikosti Burgersova vektoru na povrchu krystalu (řádově  $10^{-10}$  m). Tento skok lze potom chápat jako jakési „kvantum“ plastické deformace.



Obr.5.1. Pohyb hranové dislokace.

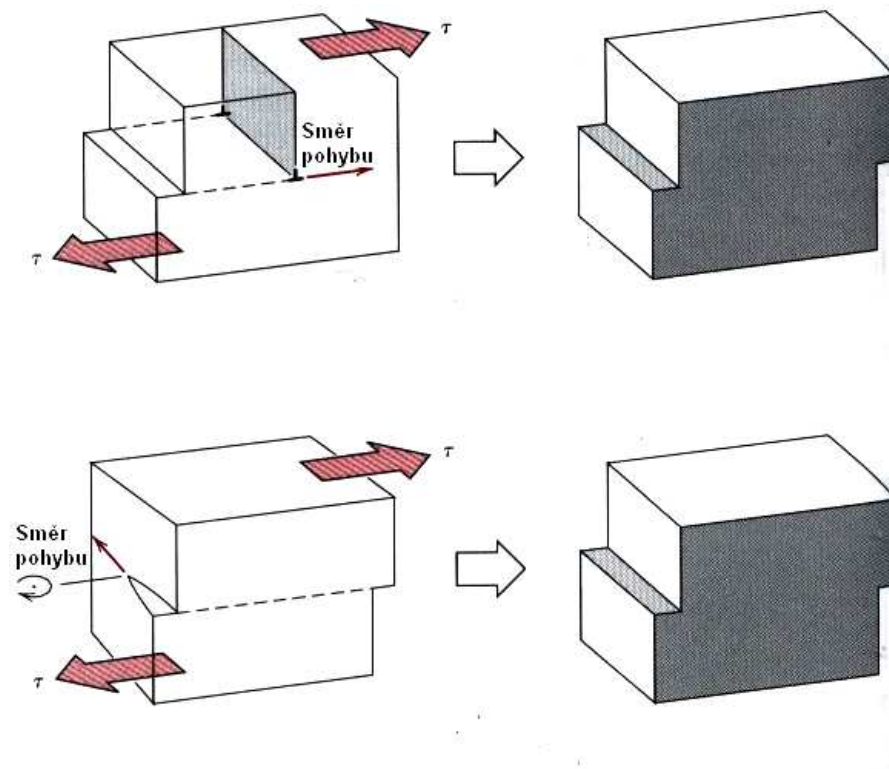
Pohyb dislokace lze tedy přirovnat k pohybu některých živočichů, jako je například píďalka (Obr.5.2). Ta se pohybuje s vynaložením minimální energie tak, že na svém těle vytvoří malé vyvýšení, které se posouvá podél celé délky těla, až dojde k posunutí celého jejího těla. Podobně se pohybují hadi, dešťovky, housenky apod., ale téhož principu se používá například i při kladení koberců. Z makroskopického hlediska je pohyb dislokace hranové a šroubové a jeho výsledek znázorněn na Obr.5.3.





Obr.5.2. Názorné objasnění pohybu dislokace.

Pro objasnění plasticity kovů je třeba ještě zdůraznit další skutečnost: kolem dislokace existuje napěťové pole nad dislokací kompresní a pod ní dilatační (Obr.5.4)



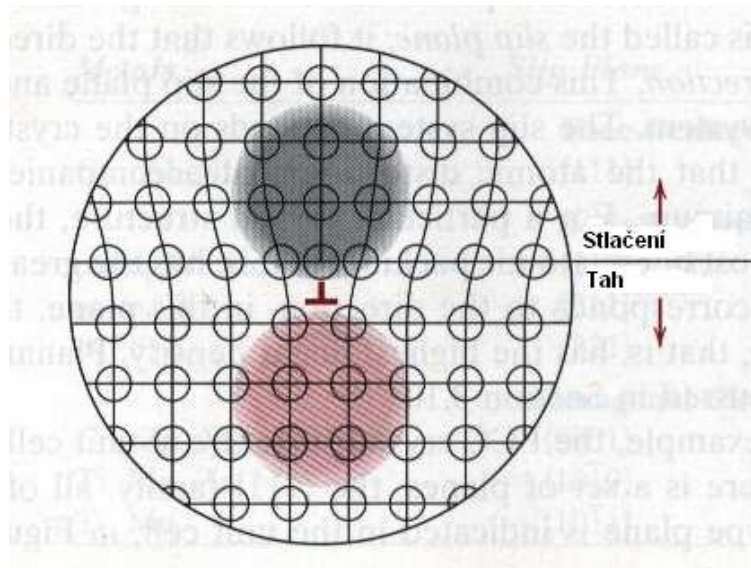
Obr.5.3. Makroskopické znázornění pohybu dislokace hranové a šroubové.

Za povšimnutí stojí i z obrázků dislokace plynoucí skutečnost, že těsně pod dislokační čarou je „více místa“, než nad ní. Navíc je zde řada atomů s volnými nenasycenými vazbami. To má za následek různé zajímavé jevy, jako je například difúze podél dislokace (pipe diffusion), koroze, změna elektrické vodivosti, dekorování dislokací, apod.

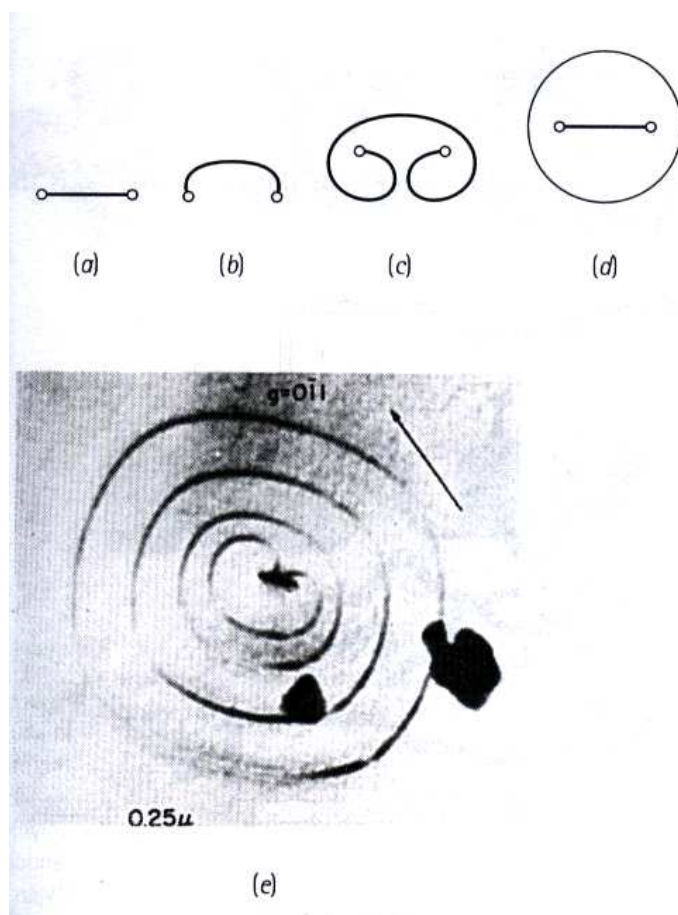
Dosud popsaný mechanismus pohybu dislokací by měl teoreticky za následek vznik bezdislokačního (ideálního) krystalu, neboť po aplikaci vnějšího napětí by všechny dislokace „vyšly“ na povrch krystalu. Experimentální výsledky jsou však naprosto odlišné – během plastické deformace hustota dislokací neklesá, ale naopak prudce narůstá. Mechanismus, vysvětlující proč tomu tak je, navrhli Frank a Reed. Je to tzv. Frankův – Reedův (F-R) zdroj



dislokací (Obr. 5.5), který může „emitovat“ obrovské množství dislokací, odpovídající makroskopické deformaci.

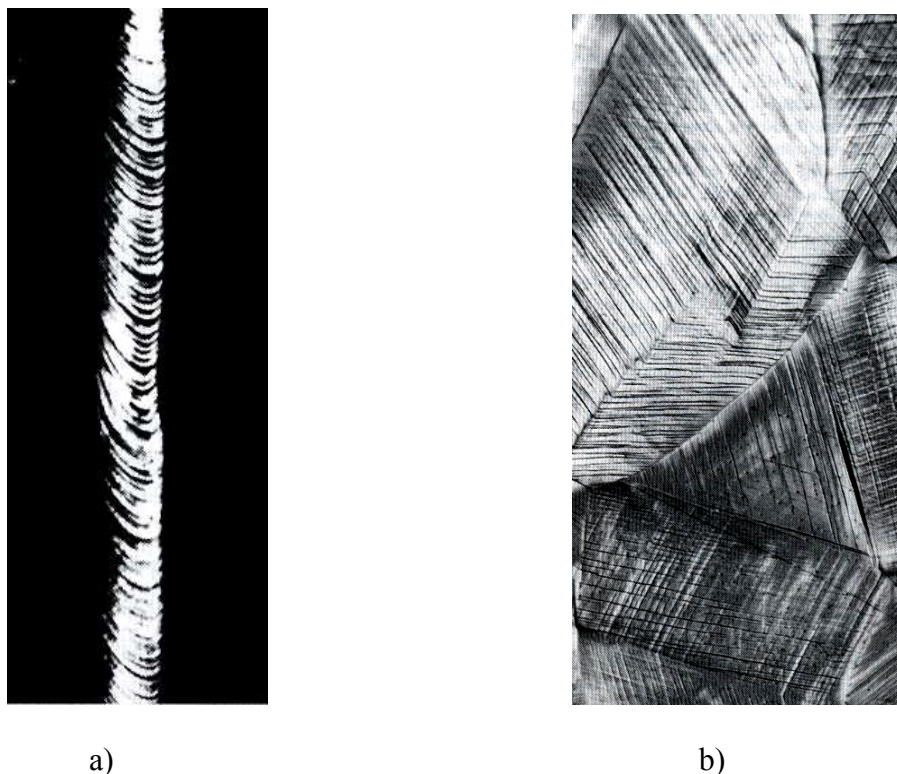


Obr.5.4. Kompresní a dilatační pole napětí v okolí hranové dislokace.



Obr.5.5. Schéma činnosti Frankova-Reedova zdroje dislokací a jeho skutečná fotografie (elektronový mikroskop)

Zpravidla se dislokace, vytvořené F-R zdroji pohybují v jedné, nebo v několika těsně spolu sousedících skluzových rovinách, zatímco ve vzdálenějších rovnoběžných rovinách ne. Vznikají tak tzv. skluzové pásy a celý obraz plastické deformace je nehomogenní (Obr.5.6 a a b). Na tomto obrázku jsou zobrazeny skluzové pásy, které vznikly při deformaci monokrystalu zinku. Skluzové pásy vznikají i při deformaci polykrystalů (Obr. 5.7, polykrystalická měď).



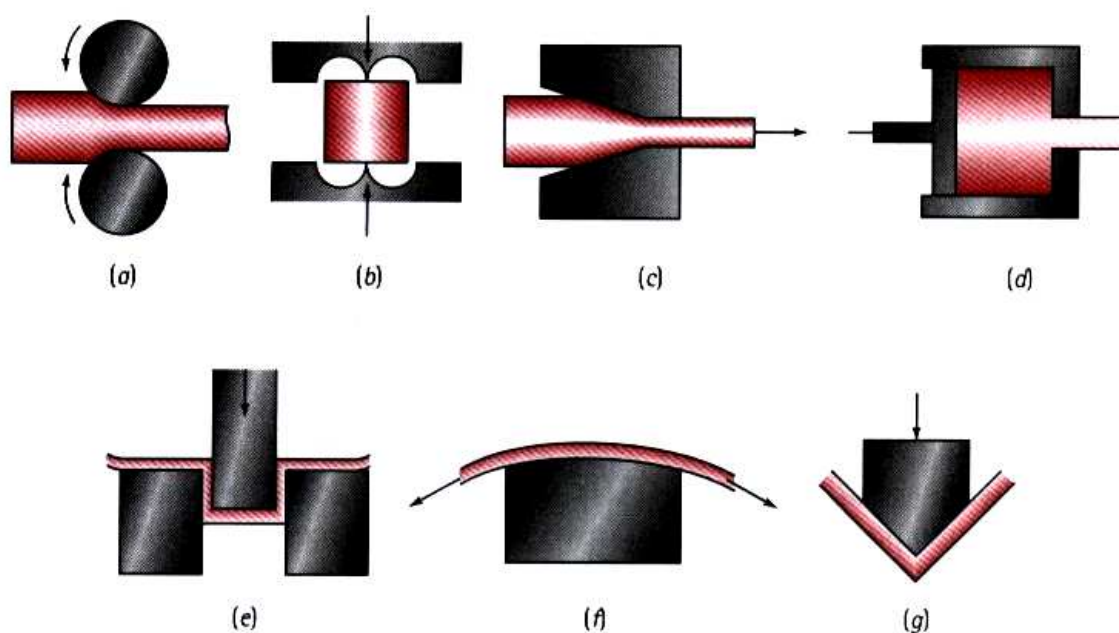
Obr.5.6. Skluzové pásy v monokrystalu zinku (a) a polykrystalu mědi (b)

Závěrem tohoto odstavce si můžeme shrnout jeho základní myšlenku. Protože plastická deformace vzniká v důsledku pohybu dislokací, je základní strategií všech technologických postupů, jejichž výsledkem má být materiál daných vlastností, ovlivňování pohybu dislokací. Chceme – li vyrobit materiál velmi tvrdý (ale bohužel křehký), musíme pohyb dislokací co nejvíce omezit. Naopak v kujném (tažném) materiálu se dislokace mohou pohybovat. Je však ještě další cesta – vyrobit a používat tzv. bezdislokační materiál, který má velkou, tzv. ideální pevnost. Výroba takových materiálů je sice možná, je však velmi drahá a takové materiály nemusí být dostatečně stabilní (trhlinky na povrchu krystalu mohou být zdrojem dislokací).

V dalších odstavcích si stručně vedeme hlavní možné způsoby ovlivňování pohybu dislokací (tzv. mechanismy zpevnění).

## 5.2. Deformační zpevnění.

Významnou překážkou v pohybu dislokací jsou dislokace v jiných skluzových rovinách, tzv. „dislokace lesa“. Proto během plastické deformace pozorujeme kladnou hodnotu směrnice křivky  $\sigma = f(\epsilon)$ , tzv. *koeficient zpevnění* – viz například Obr.(6.5.- 6.9). Deformační zpevnění je v praxi užíváno již odedávna. Například kování ostří kosa dosáhneme nejen jeho ztenčení (což bychom mohli provést snadněji broušením), ale zejména zpevnění ostří (které bude ale křehčí). Přitom zbytek kosa nebude křehký (což by bylo nevhodné, neboť by se lámala). Deformačního zpevnění používali kováři a platnění dávnověku i novověku a je využíván i v současnosti (tzv. *tváření za studena* – Obr.5.7 ) s tím rozdílem, že kovové součástky nejsou kovány ručně, ale pomocí bucharů a lisů.



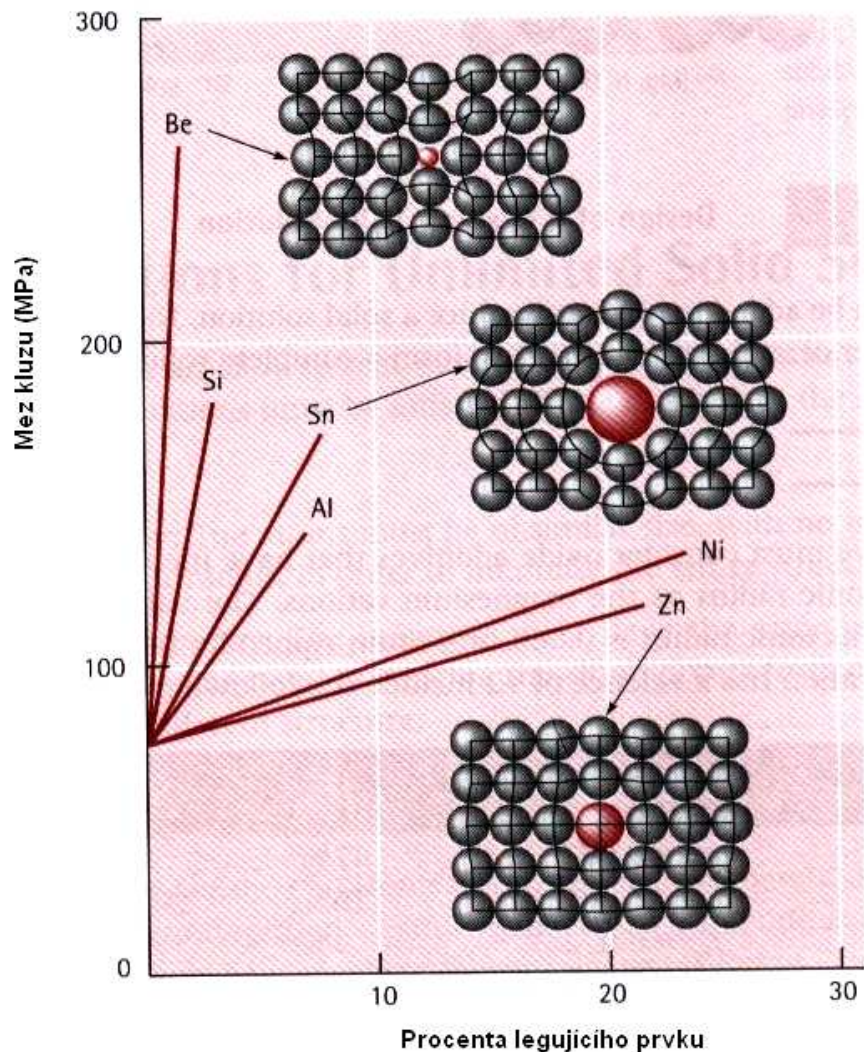
Obr.5.7. Různé způsoby strojního tváření za studena: a) válcování, b) kování, c) tažení, d) protlačování, e) hluboké tažení, f) tváření tažením, g) ohýbání.

## 5.3. Příměsově zpevnění.

Příměsově zpevnění materiálu zná lidstvo už asi 5600 let, neboť v té době začíná přibližně doba bronzová. Právě v té době, neznámo kde, člověk objevil skutečnost, že vzájemným slitím dvou měkkých kovů, tj. mědi (44 HB) a cínu (4 HB) lze získat mnohem tvrdší slitinu, zvanou bronz (360 HB). Zde je HB tvrdost podle Brinella – viz další kapitola.

V odstavci 4.2.2. jsme diskutovali vliv atomů příměsí na jejich rozpustnost v atomech základního prvku. Dá se předpokládat, že podobný vliv budou mít atomy příměsí i na mechanické vlastnosti vzniklé slitiny. Z Obr. 5.8. vidíme, jaký vliv má rozdíl poloměrů atomů příměsí a základního prvku na velikost meze plasticity slitiny ( v okolí větších, nebo menších atomů vzniká velké napětové pole a oblastí, v níž jsou taková pole rozmístěna, se dislokace obtížněji „prodírají“). Pokud jsou poloměry obou druhů atomů přibližně stejné, je vliv atomů příměsí nepříliš velký (daný zřejmě pouze rozdílem vazeb mezi atomy základního prvku mezi sebou a atomy příměsí a atomy základního prvku navzájem – Zn a Ni v Cu). Je-li rozdíl poloměrů atomů příměsí a atomů základního prvku větší, je vliv atomů příměsí na mez plasticity slitiny mnohem zásadnější (Al, Sn a Si, Be v Cu).





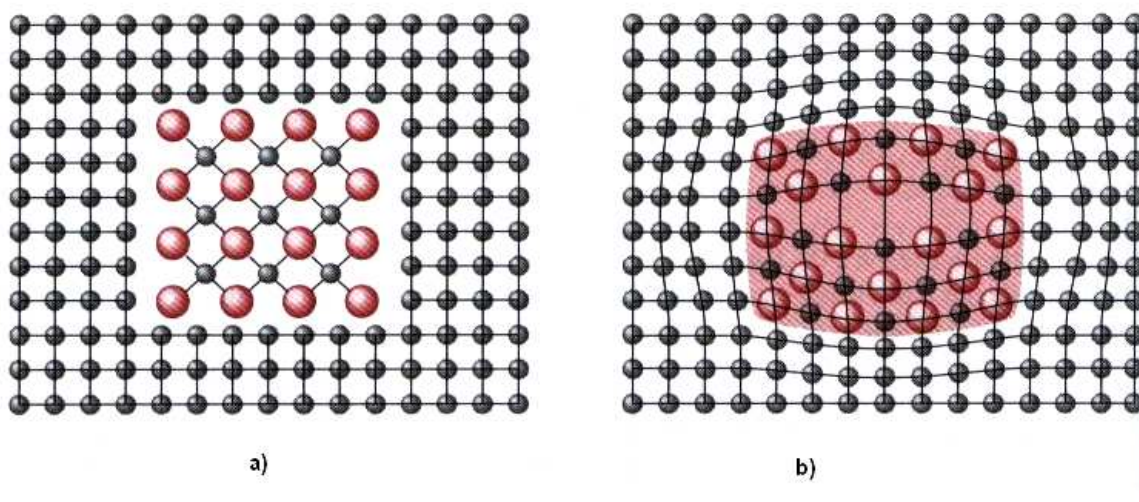
Obr.5.8. Vliv velikosti atomů příměsí na zpevnění mědi.

Závěrem odstavce shrňme kvalitativně vše, co známe o vlivu atomů příměsí na vlastnosti slitin:

- Mez plasticity, zpevnění a tvrdost slitiny je větší, než pro čistý kov, jeden, nebo druhý).
- U většiny slitin je jejich tažnost menší, než tažnost čistého kovu (výjimkou je mosaz, CuZn)
- Elektrická vodivost slitiny je mnohem nižší, než vodivost čistého kovu (příměsí, nebo matrice).

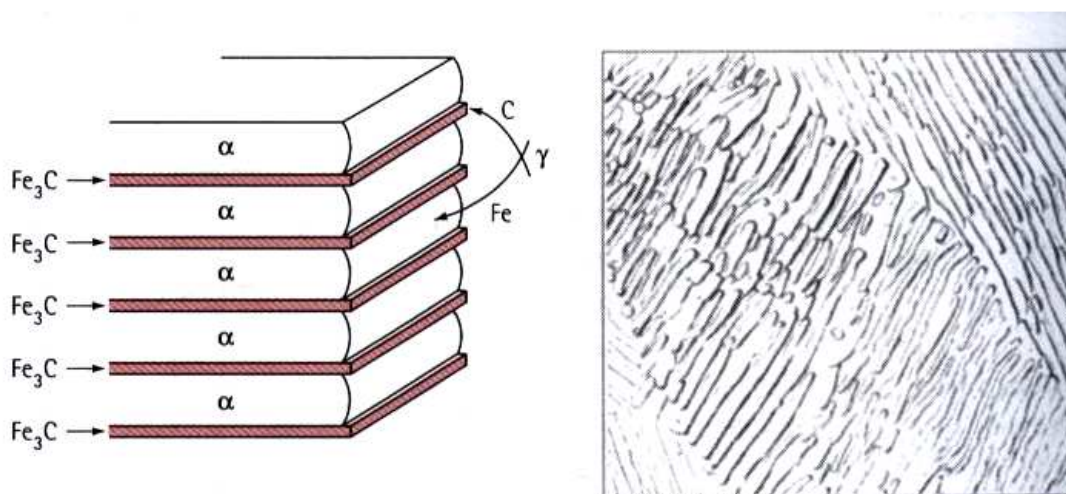
## 5.4. Precipitační zpevnění.

V odstavci 4.2.2. jsme kromě jiného uvedli, že rozpustnost některých prvků v jiných může být dosti omezená. Fyzikální stránky tohoto problému si ještě všimneme podrobněji, zatím stačí poznamenat, že v případě omezené, nebo nulové rozpustnosti vznikají v materiálu matrice tzv. *vměstky*, neboli *precipitáty*. Jsou to tzv. částice druhé fáze, které mají často zcela odlišné fyzikální a chemické vlastnosti a krystalickou strukturu. Jako příklad uvádíme na Obr.5.9 a,b. schematické znázornění tzv. koherentního a nekoherentního precipitátu.



Obr.5.9. Nekoherentní a) a koherentní precipitát b).

Z obrázku je na první pohled jasné, že oba druhy precipitátů jsou značnou a většinou nepřekonatelnou překážkou pro pohyb dislokací. Typickým materiálem, ve kterém se vyskytují precipitáty různého složení i různého tvaru je ocel, což je slitina železa a uhlíku. Precipitáty v oceli jsou tvořeny většinou karbidem křemíku  $\text{Fe}_3\text{C}$ , který mívá tvar kuliček, destiček, nebo má tvar nepravidelný (Obr.5.10)



Obr.5.10 Schematický tvar precipitátů  $\text{Fe}_3\text{C}$  a skutečný snímek (optický mikroskop).

Tepelným zpracováním můžeme změnit tvar precipitátů a tím i mechanické vlastnosti oceli v širokém intervalu hodnot. Přidáme – li i možnost dislokačního zpevnění, případně chemické úpravy (probubláváním tekuté oceli vzduchem nebo kyslíkem, můžeme v ní snížit obsah uhlíku), spolu s jinými druhy příměsí (Ni, V, Cr, Si apod.), dostáváme skutečně velmi širokou škálu různých konstrukčních ocelí s možností „ušítí“ vlastností na míru.

## **5.6. Zpevnění pomocí hranic zrn.**

Hranice zrn (odstavec 4.3.2) jsou jako plošné poruchy složeny buď z dislokací (malouhlové hranice), nebo z tenké téměř amorfni vrstvičky (velkouhlové hranice) a již na první pohled jsou značnou překážkou pro pohyb dislokací. Deformace polykrystalů s velkým zrnem je obvykle dána hlavně deformací uvnitř zrn na rozdíl od deformace polykrystalů s malými zrny, která se téměř nedeformují a „kloužou“ po sobě (tzv. *pokluz po hranicích zrn*).

Velikost a tvar zrn se během deformování mění, přičemž se tvar jednoho zrna přizpůsobuje tvaru zrn sousedních (nevznikají mezi nimi kavity – prázdná místa). V tom případě hraje velký význam mechanismus difúze atomů, silně ovlivňovaný teplotou deformovaného materiálu.

Poznámka: Ve fyzice pevných látek se nízkou (resp. vysokou) teplotou rozumí teplota nižší, (resp. vyšší), než je polovina teploty tání  $T_M$  ( v  $K$ ) dané látky.

## **6. Mechanické vlastnosti kovů.**

Kovy jsou již po několik století nejvýznamnějšími konstrukčními materiály ve strojírenství a stavebnictví. Proto budeme věnovat tuto kapitulu právě mechanickým vlastnostem kovů a slitin. Jak uvidíme později, dají se některé závěry, týkající se kovů aplikovat i na jiné materiály.

### **6.1. Pružné (elastické) vlastnosti kovů.**

Jestliže namáhané těleso zaujme po odtižení svůj původní tvar, potom říkáme, že jsme nepřekročili oblast pružné (nebo též elastické) deformace. Tuto větu můžeme pokládat za kvalitativní definici pojmu *pružná deformace*. Z technického hlediska lze pružnou deformaci uskutečnit několika způsoby:

- a) deformací v tahu (tlaku),
- b) deformací ve smyku ,
- c) všestrannou deformací (v tlaku),
- d) deformací v torzi – ta se dá převést na deformaci ve smyku.

Dále si stručně všimneme některých z nich.

#### **6.1.1. Deformace v tahu, nebo tlaku.**

Působí – li na těleso (pro názornost těleso protáhlého tvaru délky  $l_0$  – Obr.6.1a) ve směru podélné osy síla  $F$ , dojde k protažení tělesa o délku  $\Delta l = l - l_0$ . Pro malá prodloužení potom pozorujeme (stejně jako v 17. století anglický fyzik Robert Hooke) přímou úměrnost mezi silou a prodloužením. Abychom vyloučili vliv geometrických parametrů namáhaného vzorku (kromě původní délky  $l_0$  též původní průřez vzorku  $S_0$ ), je vhodné zavést do zmíněné úměry bezrozměrnou veličinu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6.1)$$

tzv. *relativní prodloužení* a veličinu *normálové napětí* vztahem

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (6.2)$$

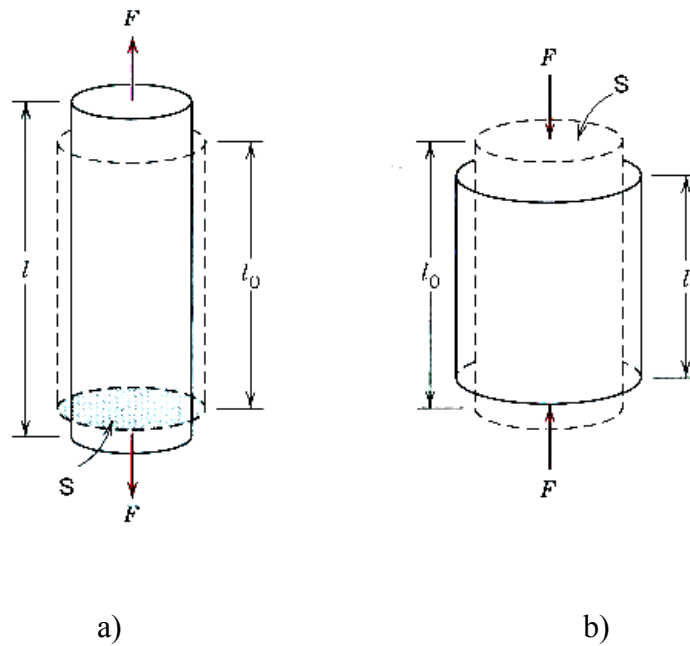
Potom lze psát Hookův zákon ve tvaru

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S_0}, \quad \text{tj.} \quad \varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (6.3)$$

kde  $E$  je materiálová konstanta, tzv. *Youngův modul pružnosti v tahu*. Velikost  $E$  je pro kovy řádu  $10^{10} - 10^{11}$  Pa.

V případě deformace v tlaku je situace obdobná jako v tahu, pouze směr síly je opačný (Obr. 6.1b).

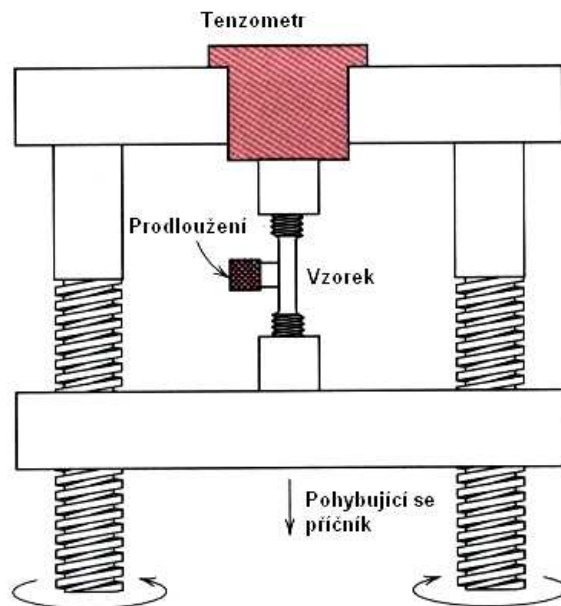
V případě krystalických materiálů jsou v důsledku jejich anizotropie veličiny  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  a  $E$  závislé na směru působení síly, jsou tzv. tenzory (veličiny, reprezentované maticemi).



Obr. 6.1. Pružná deformace v tahu a tlaku.

Z důvodu jednoduchosti budeme dále předpokládat, že se jedná o deformaci izotropního materiálu (a to je v případě polykrystalů přípustné).

Pro úplnost je třeba ještě uvést alespoň jeden ze způsobů praktického provedení elastické deformace. Je to klasický způsob využití tzv. deformačních strojů různého typu. Schéma jednoho z nich je uvedeno na Obr. 6.2. Grafickým výstupem měření na takovém stroji je křivka  $\sigma = f(\epsilon)$ , která je pro pružnou deformaci reprezentovaná přímkou se směrnici  $E$ .



Obr.6.2. Typický deformační stroj typu Instron.



### 6.1.2. Deformace ve smyku

Schéma praktického provedení elastické deformace ve smyku je ukázáno na Obr.6.3a). Po zavedení bezrozměrné veličiny

$$\gamma = \frac{x}{a} \quad (6.4)$$

zvané *zkos* a *tečného napětí*

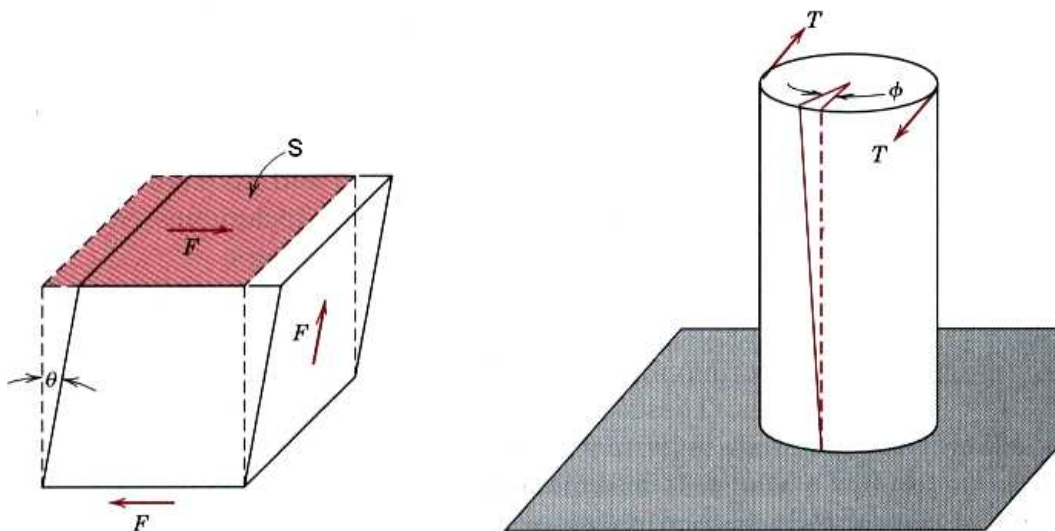
$$\tau = \frac{F}{S_0} \quad (6.5)$$

má Hookův zákon pro pružnou deformaci ve smyku tvar

$$\frac{x}{a} = \frac{1}{G} \frac{F}{S_0}, \quad \text{tj.} \quad \gamma = \frac{1}{G} \tau \quad (6.6)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku. I v tomto případě jsou pro krystalické materiály veličiny  $\gamma$ ,  $\tau$  a  $G$  tenzory.

Na Obr.6.3b) je ukázána schematicky deformace v torzi. Z obrázku je patrné, že ji lze snadno převést na deformaci ve smyku.



Obr.6.3. Deformace ve smyku

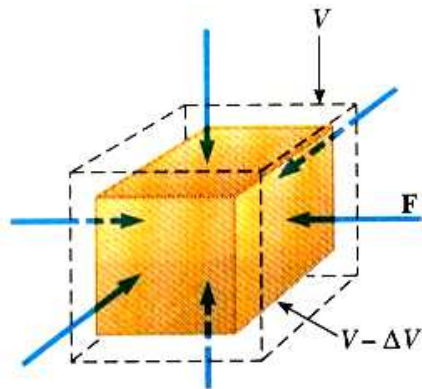
### 6.1.3. Všestranný tlak.

Působí – li na dané těleso síla  $F$  symetricky se všech stran (Obr.6.4), lze tuto deformaci převést na deformaci v tlaku a Hookův zákona napsat ve tvaru

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{K} p \quad (6.7)$$

kde  $V_0$  je původní objem tělesa,  $\Delta V = V - V_0$  je jeho změna,  $p$  je všestranný tlak a  $K$  je modul objemové pružnosti.

S působením všestranného tlaku se setkáme například u těles, nacházejících se pod vodní hladinou (ponorky, batyskafy).



Obr.6.4. Všestranný tlak.

Znalost pružných vlastností materiálů má velký význam ve strojírenství a stavebnictví (konstruktéři musí dbát toho, aby nepřekročili oblast pružné deformace). V Tab.6.1. jsou uvedeny konstanty  $E, G$  a  $K$  pro některé polykrystalické kovy a nekovové materiály.

Tab.6.1.

Látka	$E \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$G \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$K \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	Látka	$E \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$G \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$K \cdot 10^{-10} \text{Pa}$
Al	7,07	2,64	7,3	dural	7,25	2,75	7,5
Si	9,5	3,3	31,3	litina	11,0	4,4	7,3
Cu	12,3	4,55	13,8	mosaz	9,9	3,65	11,8
Pb	1,6	0,56	4,3	ocel	20,4	7,9	16,1
Pt	17,0	6,1	25,6	$\text{SiO}_2$	7,3	3,1	3,7
Ag	7,9	2,9	10,1	kaučuk	0,00015	0,00005	0,0083
Au	7,85	2,76	16,7	polystyren	0,32	0,12	0,31
$\text{Fe}\alpha$	21,2	8,2	17,2	sklo	5 - 6	2 - 2,5	3,8 - 3,6
U	18,0	7,2	12,0	plexisklo	0,33	0,12	0,37
diamant	112,0	52,0	43,5	$\text{H}_2\text{O}$ led	0,93	0,35	0,91
bronz	9,7-10,2	3,3-3,7	11,2	NaCl	3,85	1,52	2,5

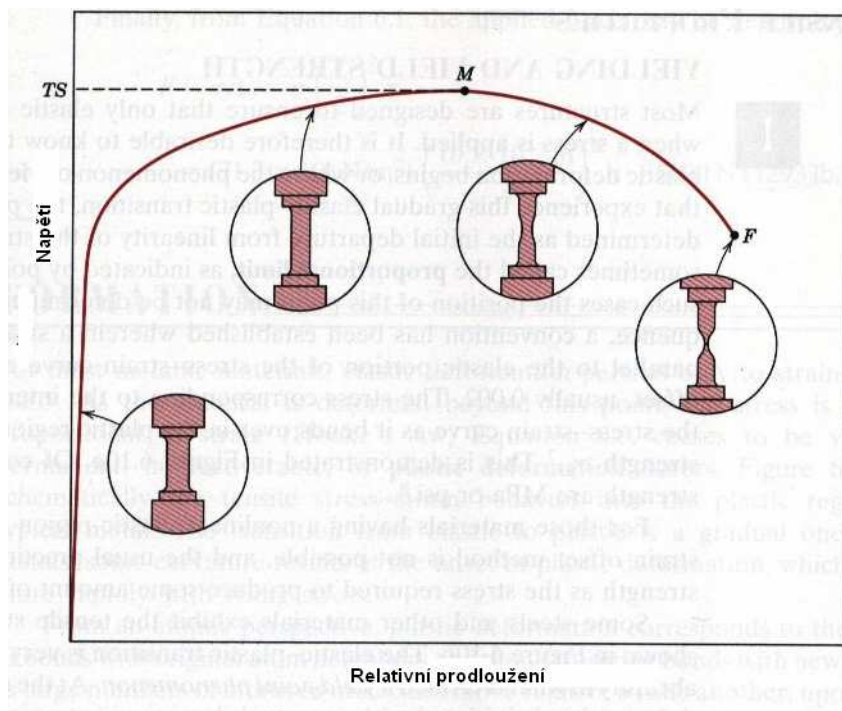
Moduly pružnosti a zejména jejich závislosti na různých parametrech (např. na teplotě) mají velký význam pro fyziku materiálů – vypovídá mnohé zejména o vazebních silách mezi atomy v pevných látkách.

Poznámka: Anelasticita.

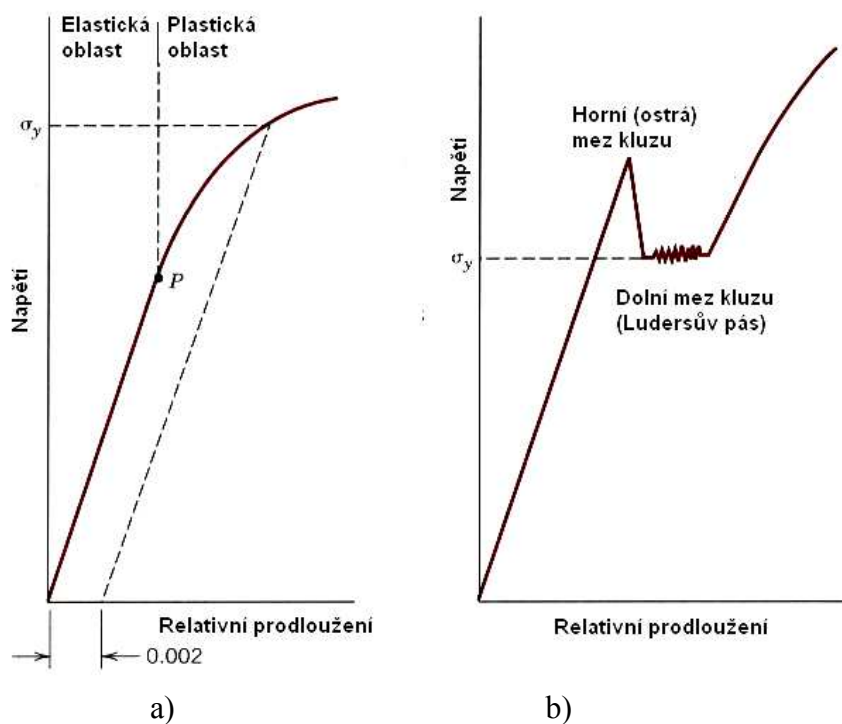
Při definování pojmu pružnost (elasticita) jsme uvedli, že po ukončení působení síly na těleso se obnoví jeho původní tvar. Tento návrat k výchozímu tvaru je velmi rychlý (daný rychlostí zvuku v materiálu tělesa). Pokud se původní tvar tělesa obnoví až po jisté delší době (vteřiny, minuty, nebo i hodiny), hovoříme o jevu *anelasticity*. U kovů je anelasticita prakticky zanedbatelná, ale u některých jiných látek, jako jsou například polymery je dobře pozorovatelná. My si jí ještě budeme věnovat v kapitole o polymerech.

## 6.2. Plastické vlastnosti kovů.

Deformujeme-li určitý vzorek například v tahu (např. v zařízení na Obr.6.2), získáme závislost  $\sigma = f(\epsilon)$ , na níž lze názorně demonstrovat jak oblast pružné deformace ( a někdy i anelasticitu), tak i oblast plastické deformace. Vidíme na ní, že počáteční přímkový úsek pružné deformace pokračuje až do přetržení oblastí plastické deformace. (Obr. 6.5). Napětí, příslušející začátku plastické deformace je technicky i z hlediska fyzikálního poznání velmi významné a nazývá se *mez kluzu* (neb *kritické skluzové napětí*). Podle tvaru diagramu pozorujeme buď tzv. *horní a dolní mez kluzu* (někdy též *ostrou mez kluzu*) – Obr.6.6b, nebo *smluvní mez kluzu*  $\sigma_y$ , Obr.6.6a). Ta udává napětí, potřebné k dosažení určité trvalé deformace, (obvykle 0,2% měřené délky) a uvádí se v označení příslušné meze, např.  $\sigma_{0,2}$ .

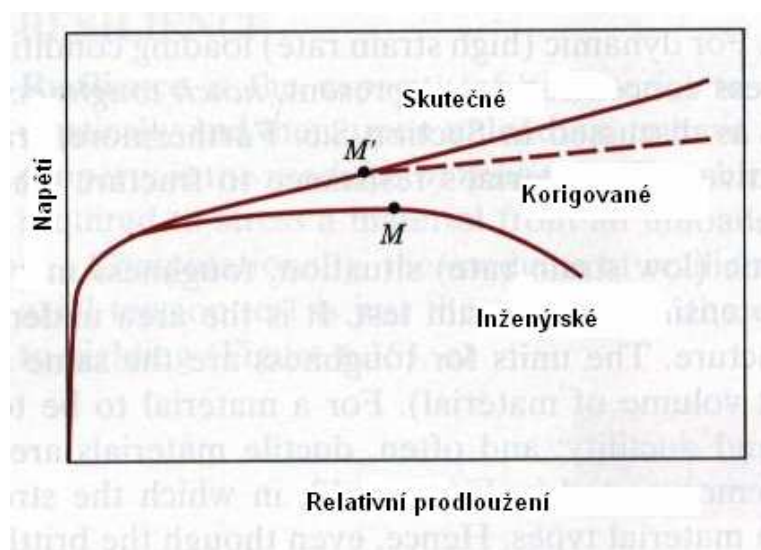


Obr.6.5. Typická křivka  $\sigma = f(\epsilon)$ , získaná pomocí stroje na Obr.6.2.



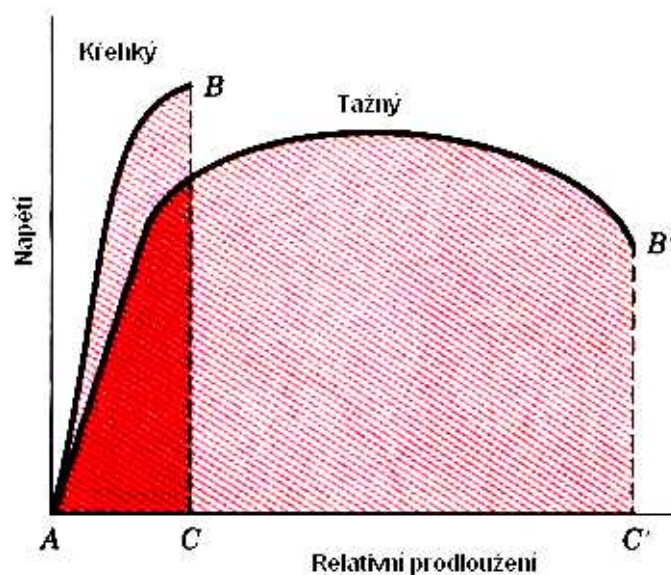
Obr.6.6 a,b. K určení meze kluzu.

Ze schematického obrázku (Obr.6.5) vidíme, že deformování některých materiálů (zejména těch houževnatějších) může být značně nehomogenní (v jistém místě vzorku se vytvoří zúžení (krček) a v tomto místě dojde nakonec k přetržení vzorku. Protože však napětí kvůli jednoduchosti stále počítáme jako poměr síly a původního průřezu materiálu, klesá křivka  $\sigma = f(\epsilon)$  s rostoucím  $\epsilon$  (i když by to byl paradoxní výsledek – vzorek by se prodlužoval i v případě, že napětí klesá). Proto je fyzikálně správnější, ale experimentálně obtížnější počítat napětí jako sílu, působící na okamžitý (zmenšující se) průřez – viz křivka na Obr. 6.7.

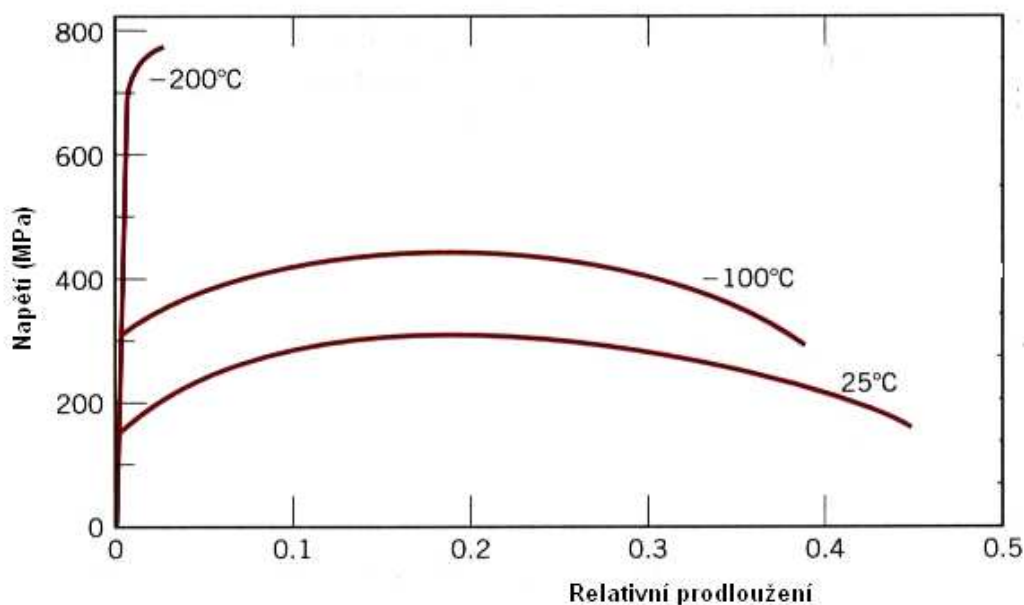


Obr.6.7. Oprava křivky  $\sigma = f(\epsilon)$  na skutečný průřez.

Důležitou vlastností materiálů je jejich *tažnost*. Je to velikost plastické deformace, kterou je třeba dodat materiálu, než dojde k lomu. Materiály, u nichž je tato veličina malá, nazýváme křehkými, na rozdíl od materiálů tažných, kde je plastická deformace do lomu velká. (Obr.6.8). Z tohoto obrázku vidíme, že tažnost lze vyjádřit jako veličinu, úměrnou ploše pod příslušnými křivkami  $\sigma - \epsilon$ . Z Obr. 6.9 plyne, že tažnost je výraznou funkcí teploty (v tomto případě se jedná o ocel).



Obr.6.8. Křivka  $\sigma = f(\epsilon)$  pro křehké a tažné materiály.



Obr.6.9. Vliv teploty na tvar křivky  $\sigma = f(\epsilon)$ .

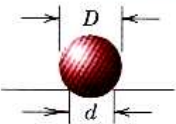



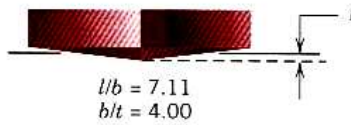
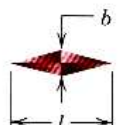
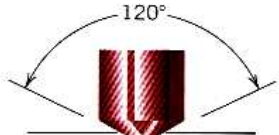





### 6.3. Tvrdość materiálu.

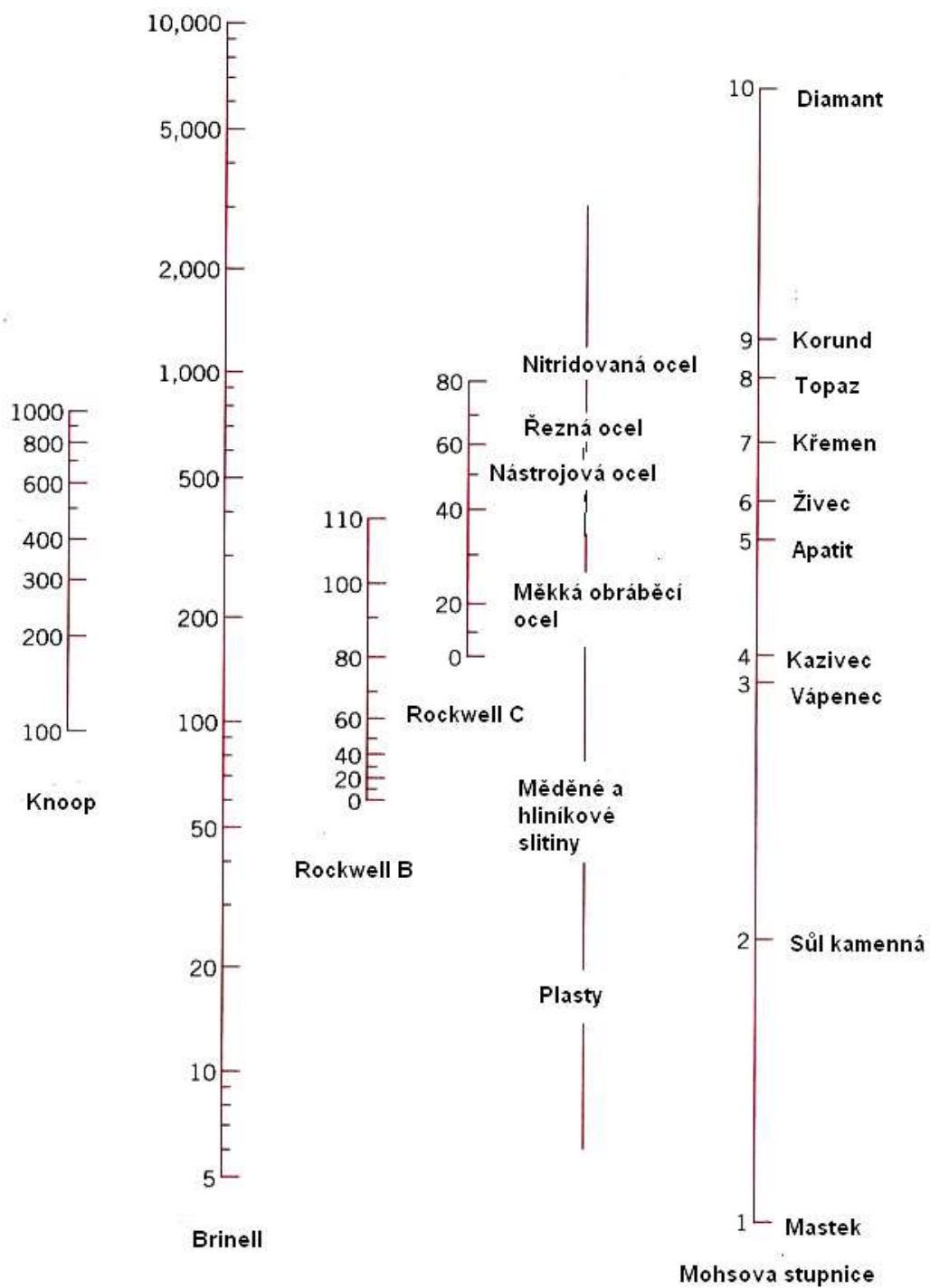
Tvrdość je další veličinou, charakterizující mechanické vlastnosti materiálu. Výhodou této veličiny je snadný způsob jejího měření a skutečnost, že se jedná o měření nedestruktivní. Nevýhodou může být poměrně složitá fyzikální interpretace získaných výsledků.

Jednou z prvních metod kvalitativního měření tvrdości materiálu je metoda užívaná zejména v mineralogii. Je založena na tzv. *Mohsově* stupnici tvrdości, podle níž vždy následující materiál je schopen udělat vryp do materiálu předcházejícího.

Mohsova stupnice: *mastek, sůl kamenná, vápenec, kazivec, apatit, živec, křemen, topaz, korund, diamant.*

Zkouška podle	Indentor	Tvar vtisku	Vztah pro výpočet tvrdości
Brinella			$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickerse			$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoopa			$HK = 14.2P/l^2$
Rockwella	 	 	

Obr.6.10. Některé metody měření tvrdości materiálu.



Obr. 6.11. Porovnání různých stupnic tvrdosti.

Zkoušky tvrdosti, užívané zejména v metalurgii a strojírenství, mají společný princip. Tvrdost je podle nich definována jako „*odpor materiálu proti vnikání jiného, tvrdšího tělesa definovaného tvaru*“. Podle tvaru tohoto tělesa (tzv. *indentoru*) dělíme zkoušky tvrdosti na (Obr.6.10):

- a) Tvrdost podle *Brinella* – vtlačována je malá kulička z tvrdokovu, měřeno je zatížení, působící na kuličku a plocha vtisku (kulový vrchlík). Tvrdost HB je potom rovna poměru těchto změřených veličin.
- b) Tvrdost podle *Vickerse* - vtlačován je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^{\circ}$ . Měřeno je opět zatížení a plocha vtisku, tvrdost HV je rovna jejich poměru.
- c) Tvrdost podle *Berkoviche* je analogická tvrdosti HV, pouze indentor má tvar trojbokého diamantového jehlanu. Metoda má výhodu experimentálního rázu – trojboký jehlan lze vybrousit do téměř ideální špičky. Ta hraje roli zejména při malých velikostech vtisku.
- d) Tvrdost podle *Knoop* je opět podobná tvrdosti podle Vickerse, diamantový indentor má takový tvar, že vtisk má dvě různé diagonály, jednu kratší a druhou delší. Metoda je vhodná k měření tvrdosti tenkých vrstev a křehkých materiálů ( i malé zatížení způsobí vtisk o poměrně velké ploše).
- e) Tvrdost podle *Rockwella* – vtiskována je buď tvrdá kulička, nebo diamantový kužel. Měřeno je zatížení a hloubka vtisku, z níž se dá snadno vypočítat plocha vtisku. Tato metoda je vhodná pro drsnější povrchy, neboť k měření nepotřebujeme optický mikroskop.

Hodnoty tvrdosti, získané jednotlivými metodami, lze přibližně porovnat mezi sebou i s Mohsovou stupnicí tvrdosti. (Obr.6.11). Ukazuje se též, že existuje i jednoduchý empirický vztah mezi tvrdostí a mezi kluzu:

$$\sigma_y \text{ (MPa)} = 3,45 \cdot HB \quad (6.8)$$

V posledním desetiletí pozorujeme značnou renesanci metod měření tvrdosti (jejichž stáří přesahuje století). Je to zejména proto, že potřebujeme znát mechanické vlastnosti tenkých vrstev i malých objemů pevných látek. Proto byly zdokonaleny metody měření mikrotvrdosti a ultramikrotvrdosti (dělení podle velikosti zatížení).

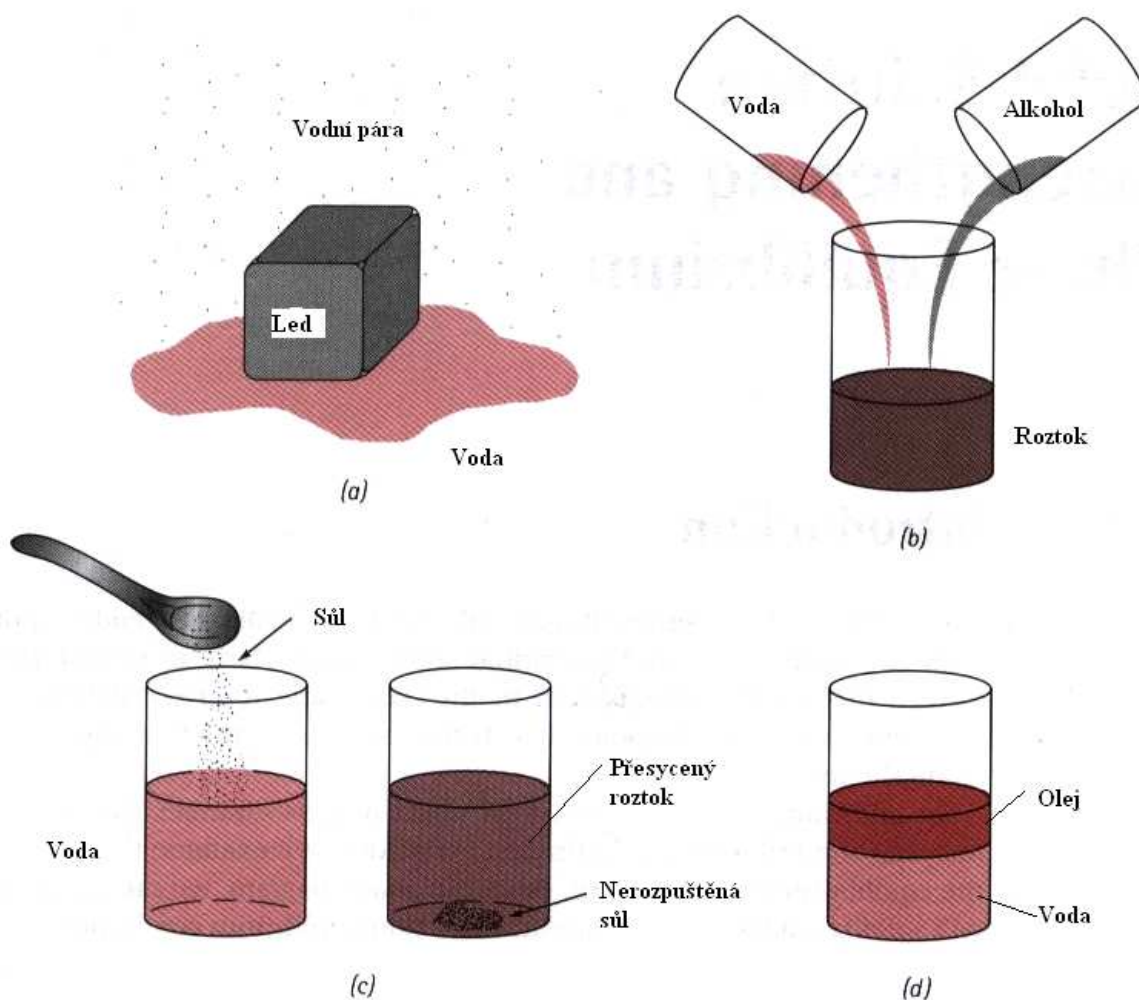
## 7. Slitiny.

Fyzikální vlastnosti pevných látek (ale i kapalin a plynů) často značně závisí na přítomnosti cizích atomů, příměsí a nečistot. V případě pevných látek pak mluvíme o slitinách. Protože slitiny mívají v mnoha případech lepší vlastnosti než čisté látky, má jejich studium velký praktický význam.

### 7.1. Fáze a fázové přeměny.

Podle J.W.Gibbse zní definice fáze následovně: *Jestliže soustava je v celém svém objemu jednotná a to nejen po stránce chemického složení, ale i po stránce fyzikálního stavu, říkáme o ní, že je homogenní, nebo že se skládá z jediné fáze.*

Pojem fáze může být názorně objasněn pomocí Obr.7.1.

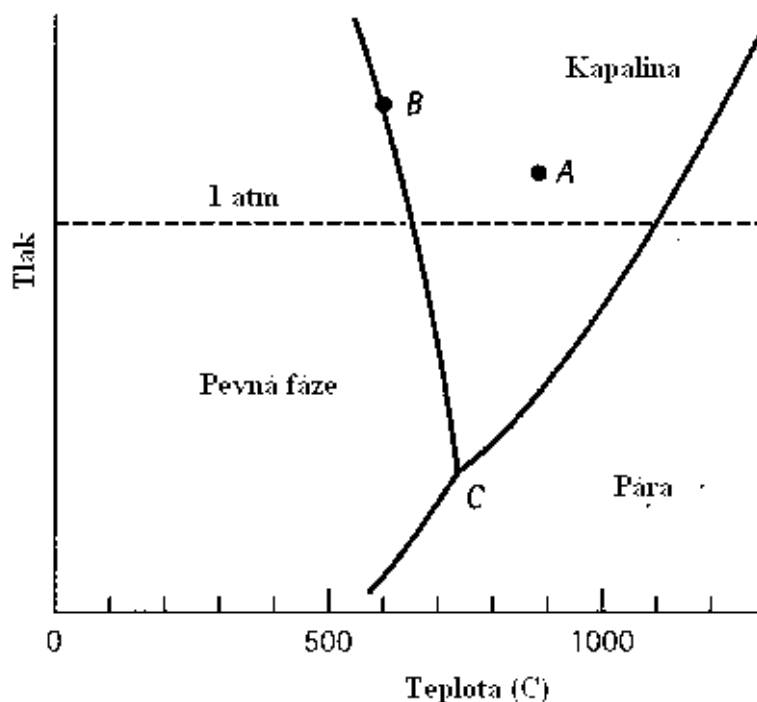


Obr. 7.1. K objasnění pojmu fáze.

Matematicky lze situaci na tomto obrázku charakterizovat tzv. *Gibbovým pravidlem fází*:

$$F = C - P + 2 \quad (7.1)$$

kde  $C$  je počet složek v soustavě,  $P$  je počet fází a  $F$  je počet stupňů volnosti (teplota, tlak, složení), které lze nezávisle měnit, aniž dojde ke změně rovnováhy fází. Jako příklad, na němž toto pravidlo objasníme, uvádíme fázový diagram čistého Mg (jednosložkový fázový diagram) – Obr.7.2.



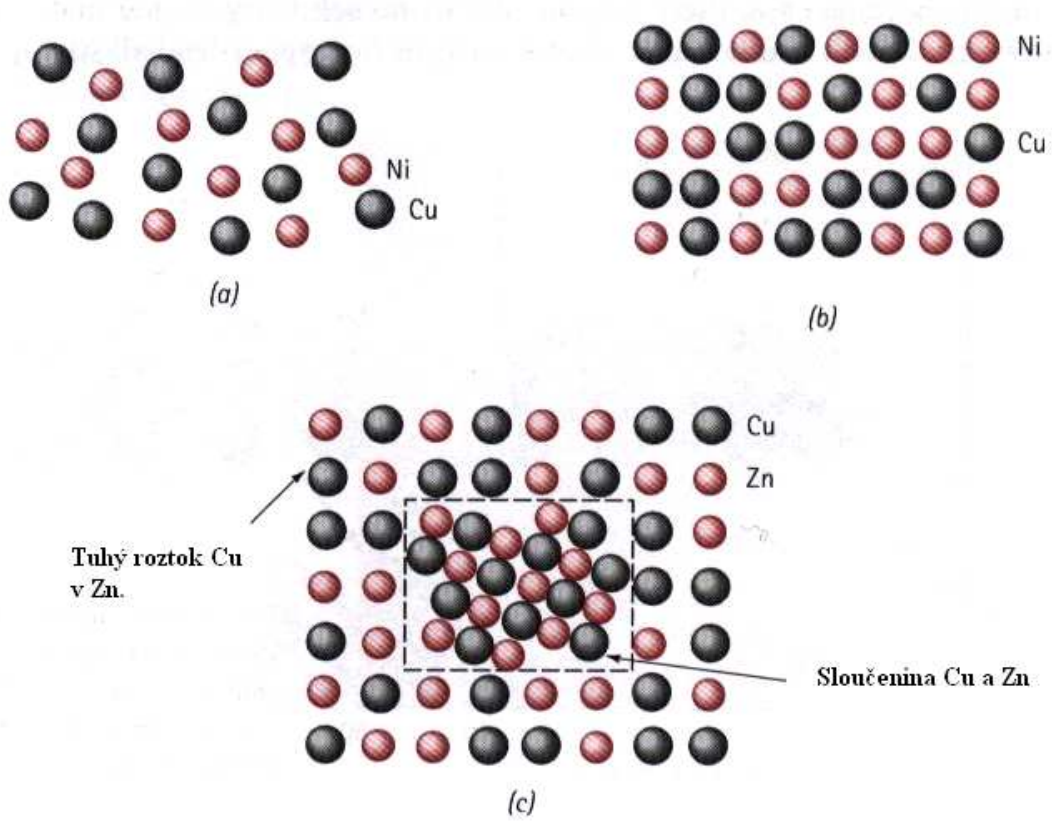
Obr.7.2. Fázový diagram hořčíku.

Předpokládejme nejdříve, že se soustava nachází při tlaku a teplotě, které odpovídají bodu A. Potom  $C = 1$  (čistý Mg),  $P = 1$  (kapalina), takže  $F = 1 - 1 + 2 = 2$ . Vychází nám tedy dva stupně volnosti a můžeme měnit buď teplotu, nebo tlak, nebo obojí a stále se budeme nacházet v „kapalně“ oblasti diagramu. Podobně máme pro bod B:  $C = 1$ ,  $P = 2$  (pevná a kapalná fáze) a tedy  $F = 1$  (měníme-li např. tlak, bude se měnit zároveň i teplota – nacházíme se na křivce CB). Nakonec pro bod C máme  $C = 1$ ,  $P = 3$  a tedy  $F = 0$  (trojný bod, daný pevnými hodnotami tlaku a teploty).

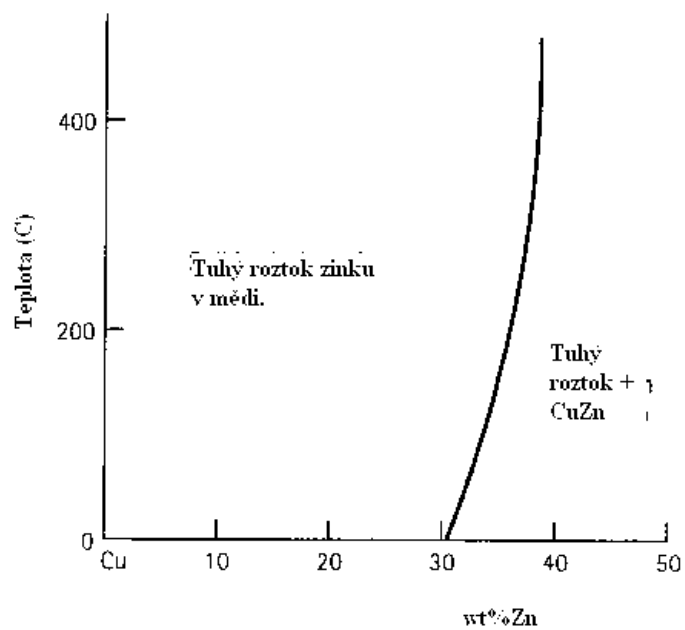
Podobně jako je tomu u kapalin (Obr.7.1), existují i u pevných látek tři případy rozpustnosti jedné látky ve druhé: úplná rozpustnost, částečná rozpustnost a nerozpustnost. Na Obr.7.3a,b. je znázorněn případ úplné a částečné rozpustnosti (Ni v Cu a Zn v Cu). Z tohoto obrázku vidíme, že v případě částečné rozpustnosti Zn v Cu vzniká jak tuhý roztok, tak i sloučenina CuZn (Obr.7.3c). Fázový diagram pro tuto slitinu je na Obr.7.4. Podmínky pro rozpustnost atomů A v atomech B jsme si uvedli v odstavci 4.1.2.

Rozpustnost v pevném stavu není omezena jenom na kovy. Na Obr. 7.5. je ukázán příklad úplné rozpustnosti v případě keramických materiálů MgO a NiO. Jedná se o úplnou rozpustnost proto, že obě sloučeniny mají stejnou krystalovou strukturu a blízké poloměry iontů i stejné mocenství.

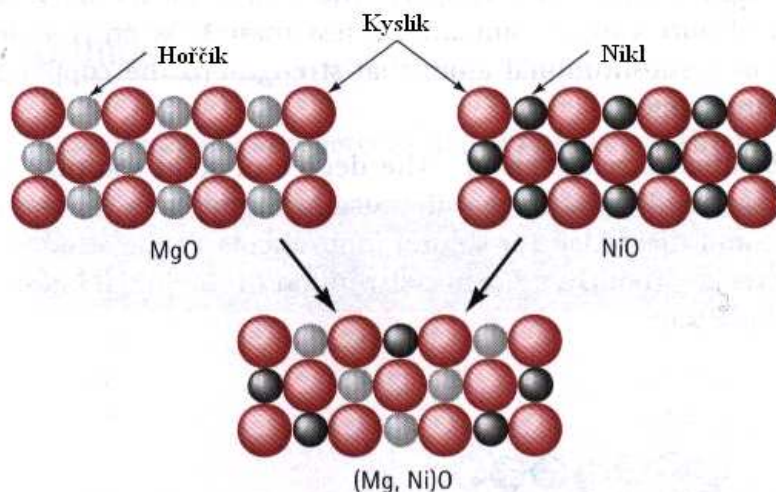




Obr.7.3. Úplná rozpustnost atomů Ni v Cu a částečná rozpustnost atomů Zn v Cu.



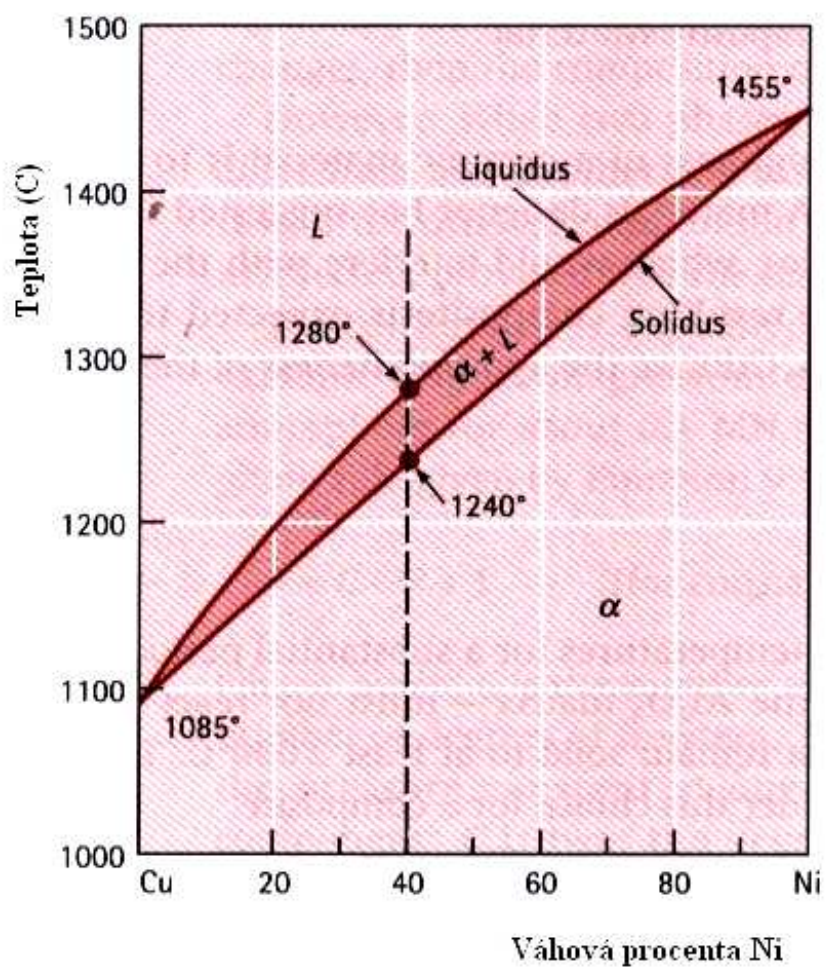
Obr.7.4. Fázový diagram slitiny CuZn



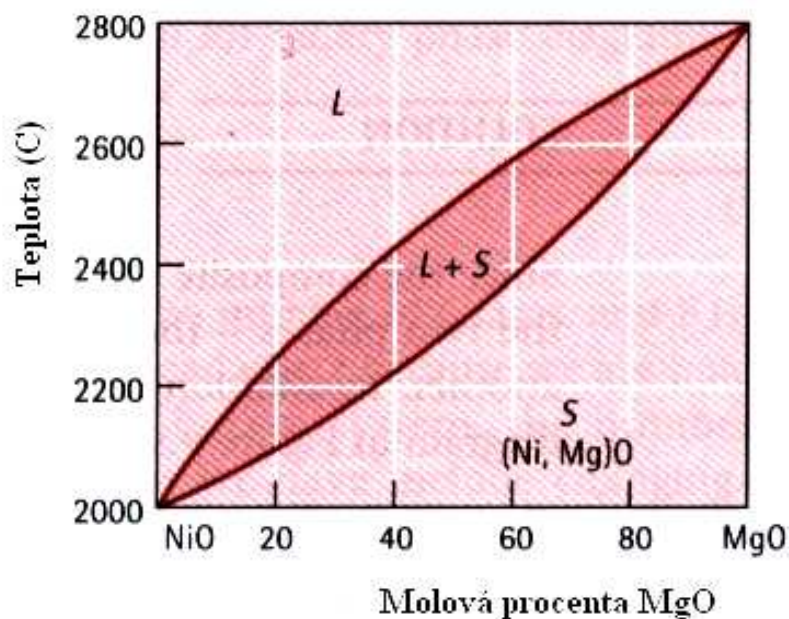
Obr.7.5. Příklad úplné rozpustnosti v případě keramických materiálů.

## 7.2. Binární slitiny v případě úplné rozpustnosti.

V případě úplné rozpustnosti jedné látky v druhé má fázový diagram v proměnných *teplota – složení* tvar, uvedený pro slitiny CuNi (Obr.7.6.). Jako *liquidus* je zde označena čára, rozdělující oblast kapalně fáze a oblast, v níž dochází ke krystalizaci pevné fáze (stále ve fázi kapalně). *Solidus* je název pro křivku, oddělující tuto posledně jmenovanou oblast od pevné fáze slitiny. Z Obr.7.6 plyne, že slitina Cu+40wt%Ni tuhne v oblasti teplot 1280 °C – 1240 °C. Písmenem  $\alpha$  je označen tuhý roztok CuNi. Podobný fázový diagram má i slitina (Ni,Mg)O (Obr.7.7.).



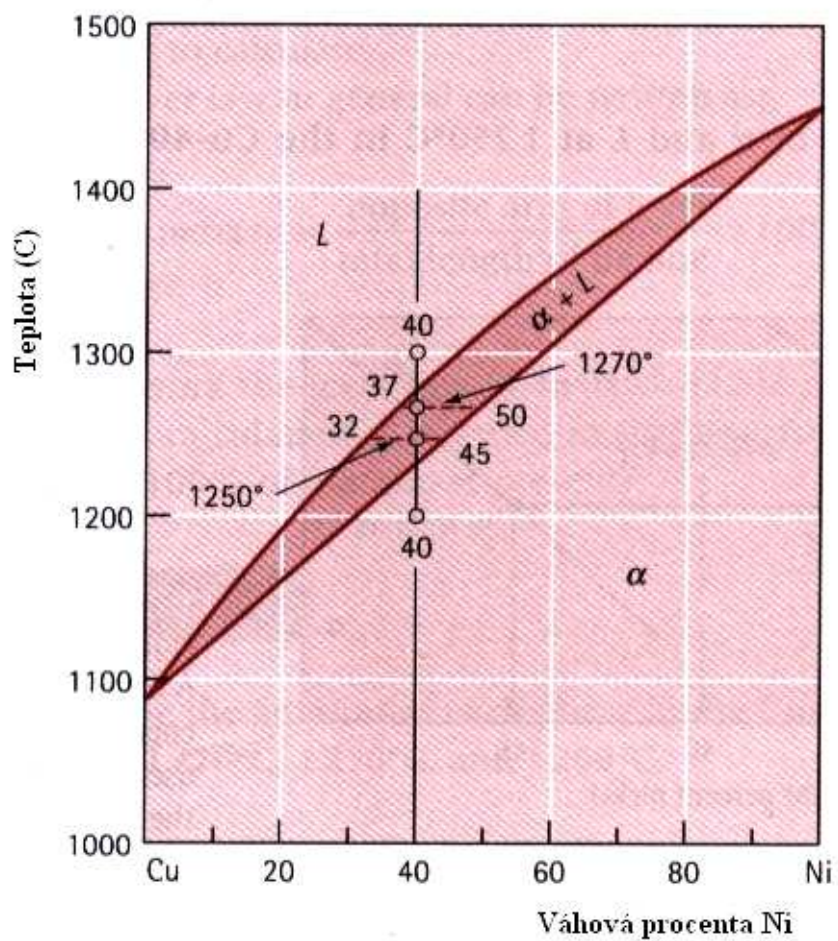
Obr.7.6. Binární slitina CuNi.



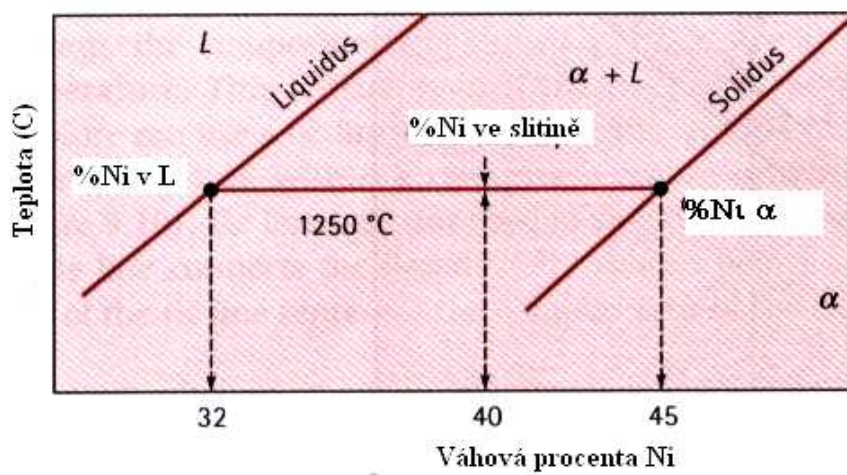
Obr.7.7. Fázový diagram slitiny (Ni,Mg)O – viz Obr.7.5.

Jako příklad pro lepší pochopení použití fázového diagramu popíšeme složení slitiny Cu+40wt%Ni (známou z Obr.7.6) při teplotách 1300 °C, 1270 °C, 1250 °C a 1200 °C. Z Obr. 7.8 a 7.9. plyne, že při teplotě 1300 °C je slitina v tekutém stavu (tvoří jednu fázi – taveninu). Při teplotě 1270 °C, nacházející se v oblasti mezi liquidem a solidem dostáváme dvě fáze, tuhý roztok  $\alpha$ -CuNi a kapalnou fázi této slitiny. Abychom popsali poměry v této oblasti, vedeme rovnoběžku s osou  $x$  (složení slitiny). Ta protne liquidus v bodě, odpovídajícím 37%Ni a solidus v bodě pro 50%Ni. Lze tedy říci, že pro teplotu 1270 °C se v roztoku slitiny CuNi začínají tvořit zmíněné krystalky  $\alpha$  CuNi, přičemž kapalná fáze se ochudí o Ni (bude ho obsahovat jenom 37%) a naopak pevná fáze ho bude obsahovat více (50%). Při teplotě 1250 °C budou existovat opět dvě fáze, kapalná bude ještě chudší na Ni (pouze 32%) a pevná ho bude obsahovat 45%. Při teplotě 1200 °C dojde k úplnému ztuhnutí slitiny, která bude nyní obsahovat 40%Ni a 60%Cu.





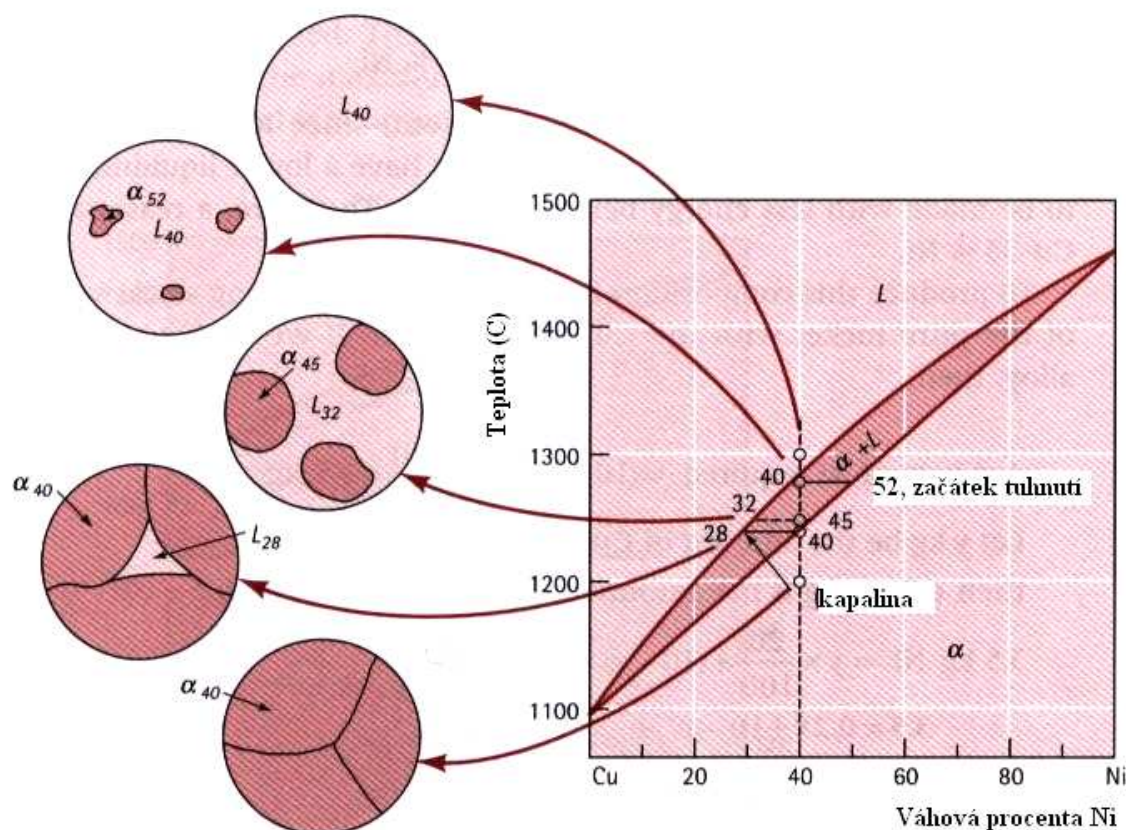
Obr.7.8. K objasnění možností fázového diagramu.



Obr.7.9. Detail z Obr.7.8.



Názorně je struktura, vznikající při tuhnutí slitiny CuNi, zobrazena na Obr.7.10. pro případ rovnovážného (pomalého) tuhnutí, kdy je umožněna dostatečná difúze atomů Cu a Ni, takže vznikne homogenní rovnovážná struktura slitiny. Pokud je tuhnutí nerovnovážné, je situace složitější a její výklad vychází za rámec této kapitoly.

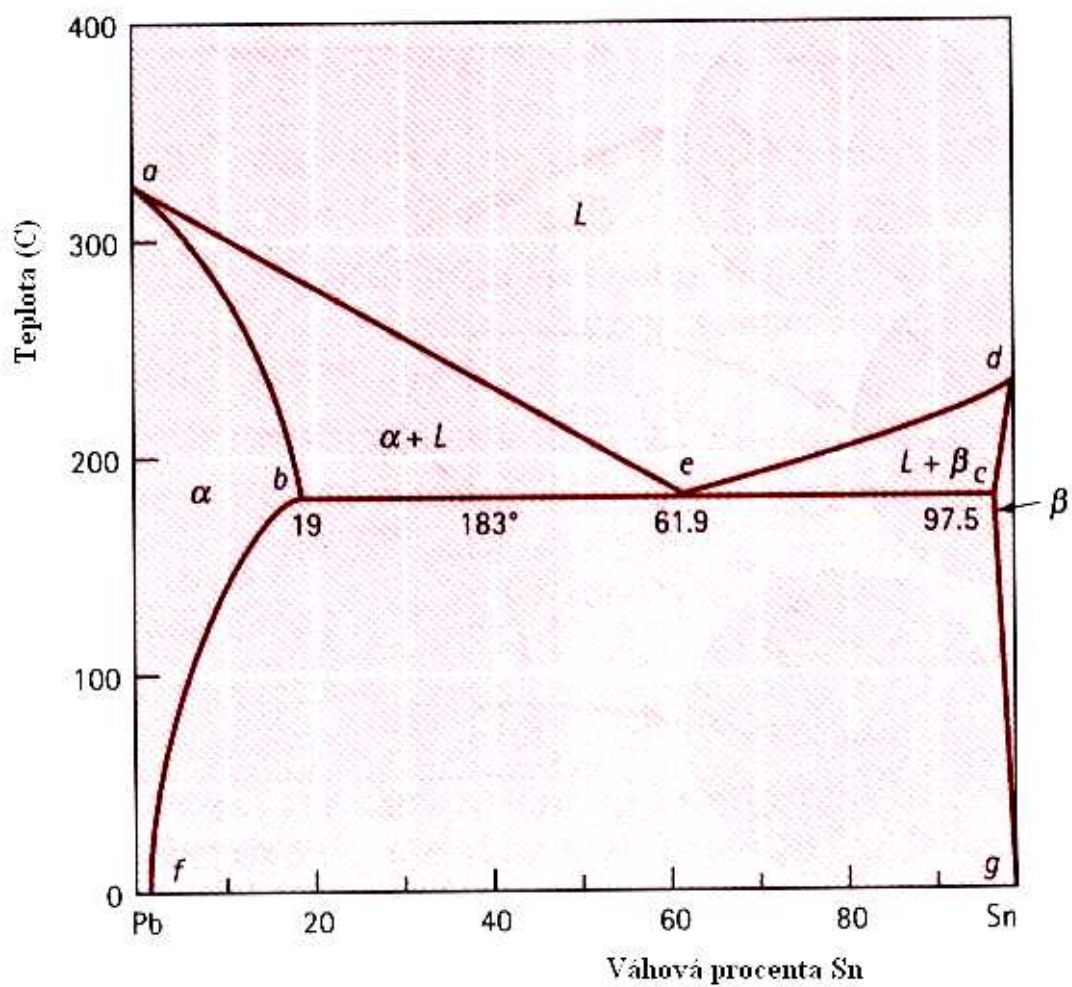


Obr.7.10. Struktury, vznikající při tuhnutí slitiny CuNi.

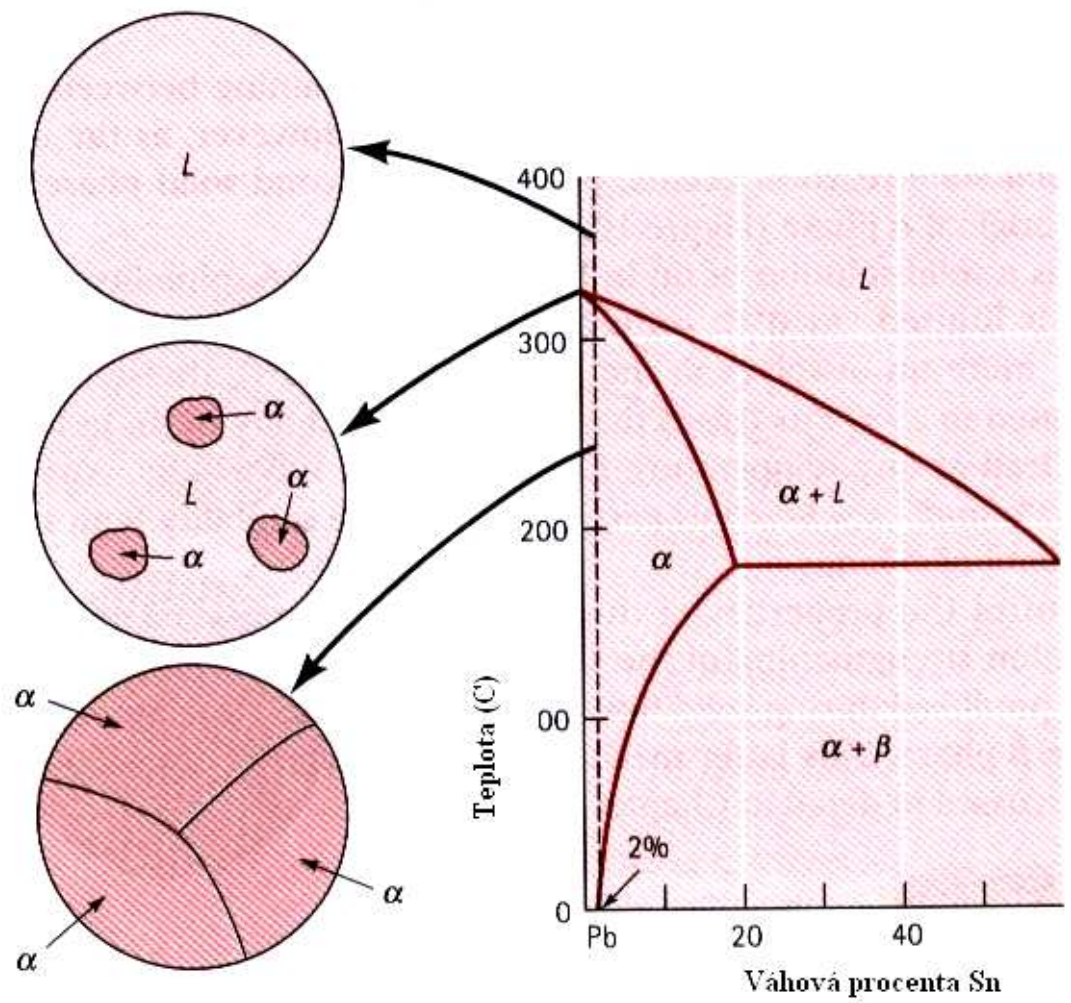
### **7.3. Binární slitiny v případě částečné rozpustnosti.**

V případě částečné rozpustnosti má fázový diagram mnohem složitější tvar, který si názorně ukážeme na Obr.7.11. pro případ slitiny PbSn. Na Obr. 7.12. je podrobněji ukázán vznik struktury slitiny pro případ malých koncentrací Sn v Pb. Na dalším obrázku (Obr.7.13) je situace poněkud složitější (slitina Pb+10wt%Sn) – vznikají precipitáty (tzv.  $\beta$  - fáze), rozptýlené ve fázi  $\alpha$  (tuhý roztok).

Zvláštním případem je tzv. *eutektická slitina* takového složení, že z kapalně fáze tuhne přímo pevná fáze, aniž tuhnutí prochází oblastmi, v nichž je tuhnoucí fáze obklopena fází kapalnou. (Obr.7.14). Složení eutektické slitiny ( v tomto případě Pb+61,9wt%Sn) má výraznou *lamelární* strukturu.

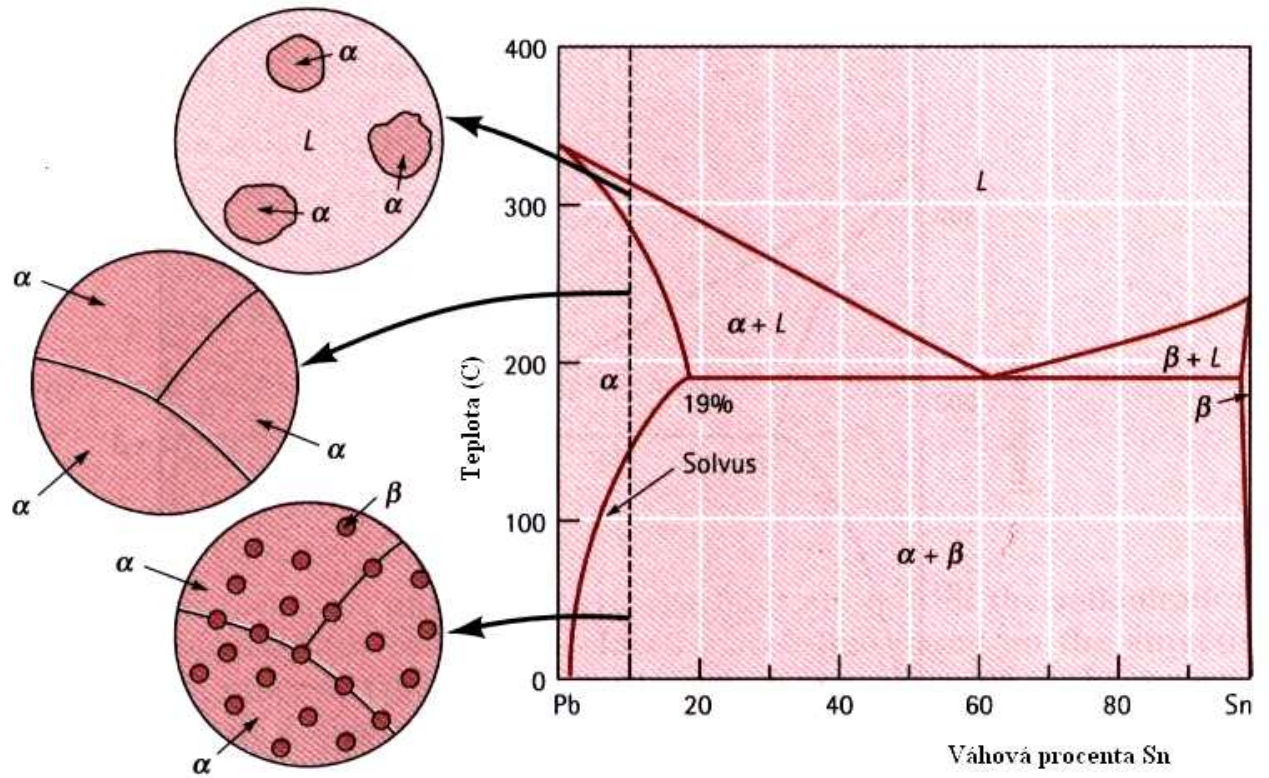


Obr.7.11. Fázový diagram slitiny PbSn (částečná rozpustnost).

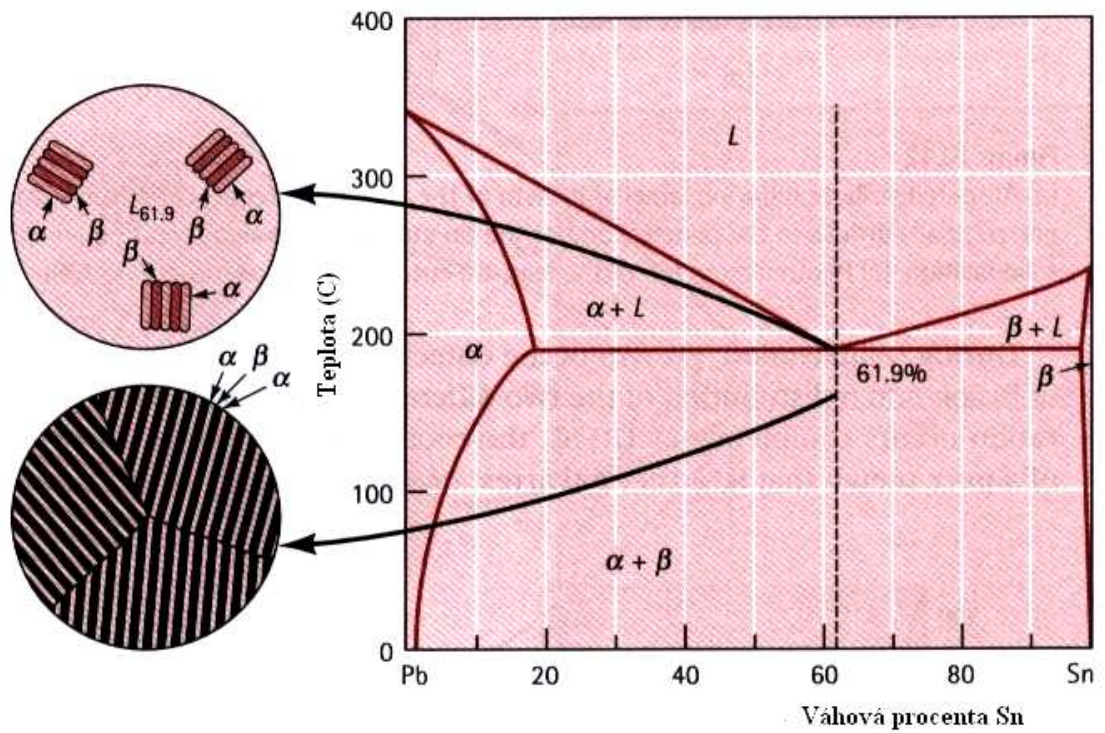


Obr.7.12. Struktura slitiny PbSn pro malé koncentrace Sn v Pb.

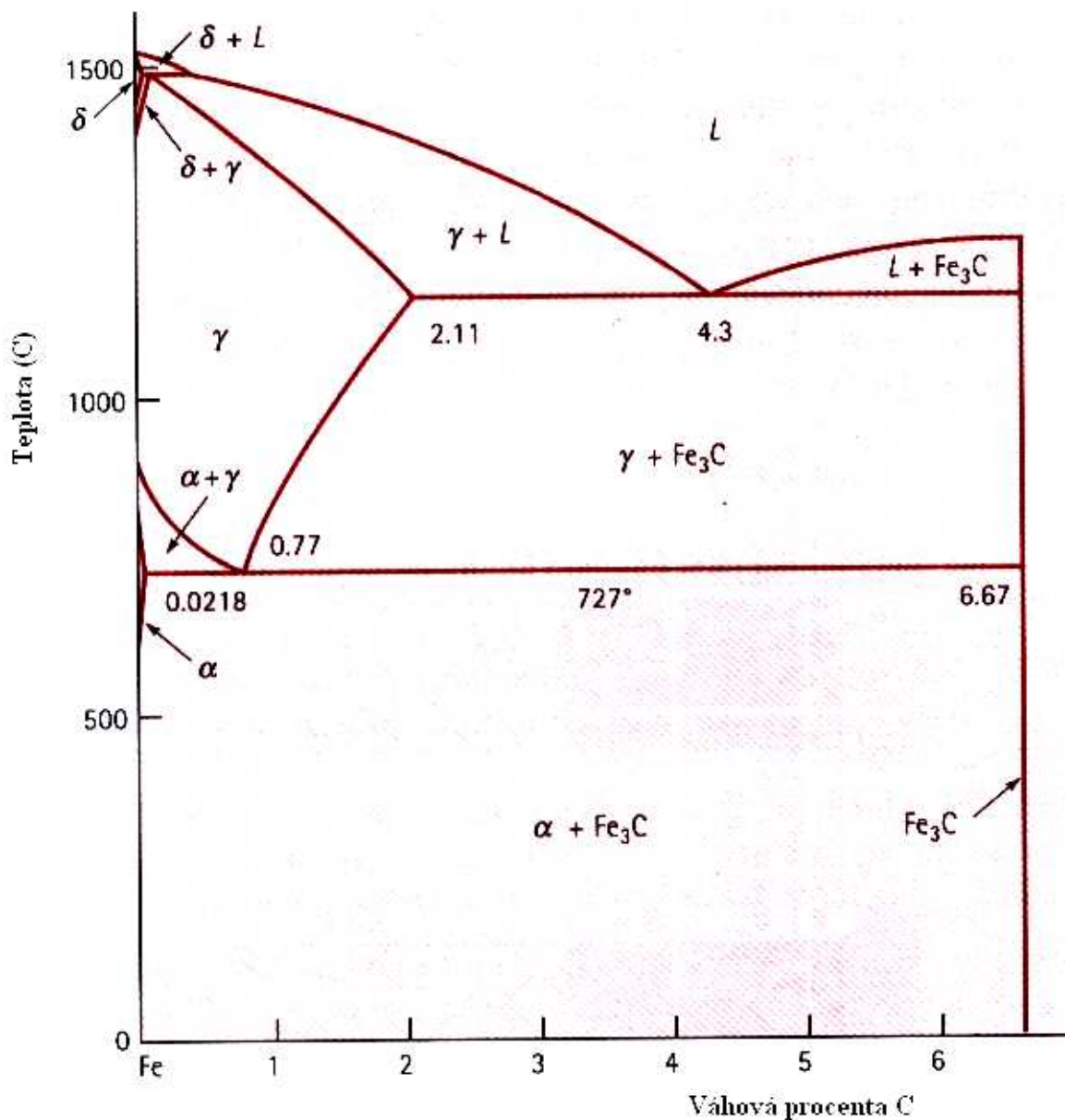




Obr.7.13. Struktura slitiny PbSn pro vyšší koncentrace Sn v Pb (kolem 10 wt% Sn)



Obr.7.14. Struktura eutektické slitiny PbSn.



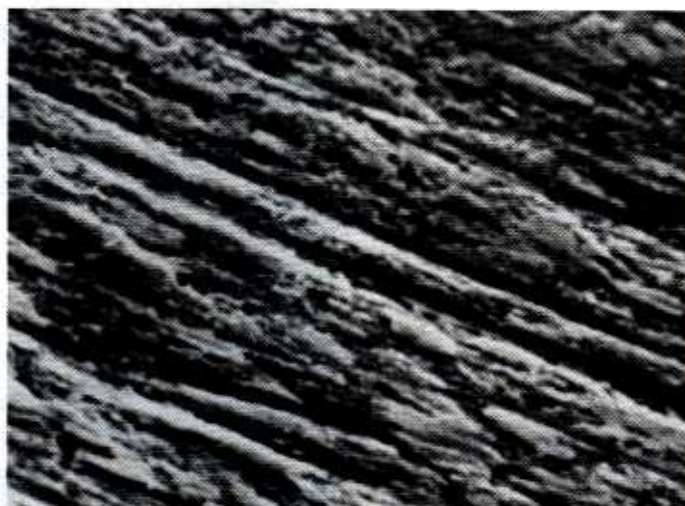
Obr.7.15. Fázový diagram technicky významných ocelí.

Ještě složitější situace nastává v případě, kdy je rozpustnost jednoho prvku velmi malá, jako je tomu v případě oceli (Fe + C). Fázový diagram pro technicky významné oceli je uveden na Obr.7.15. (pro vyšší koncentrace uhlíku dostáváme technicky nevyužívané slitiny, připomínající keramika či strusku). Z tohoto obrázku vidíme, že v případě ocelí je situace ještě mnohem složitější, než pro dosud probírané binární slitiny a proto ocelím budeme věnovat zvláštní kapitolu.



## 8. Tření.

Ze zkušenosti víme, že vyrobit ideálně hladký povrch pevné látky bude asi dosti obtížné, ne-li nemožné. I tzv. zrcadlově hladký povrch kovu se nám při dostatečném zvětšení jeví jako hrbolatý (Obr. 8.1). Proto posouváme-li po sobě dvě tělesa, budou mezi nimi působit tzv. *síly tření*. Tyto síly dělíme na síly *tření smykového, valivého, řemenového a vrtného*. Z jiného hlediska dělíme tření na *tření suché a mokré*.



Obr.8.1. 1500 x zvětšený povrch vyleštěné ložiskové oceli.

### 8.1. Tření smykové (suché).

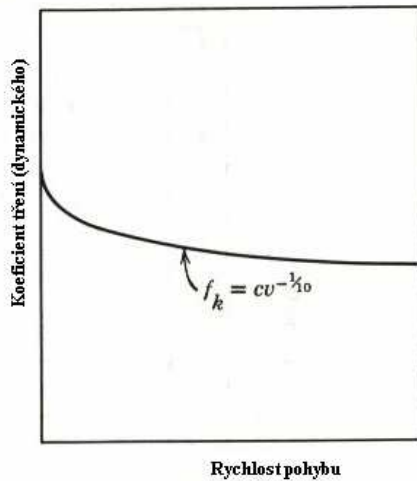
Tření smykové vzniká při pohybu jednoho tělesa po druhém (předpokládáme, že obě plochy jsou rovinné). Pro sílu tření mezi oběma tělesy platí experimentálně určený Coulombův – Amontův zákon:

$$F_t = \mu \cdot N \quad (8.1)$$

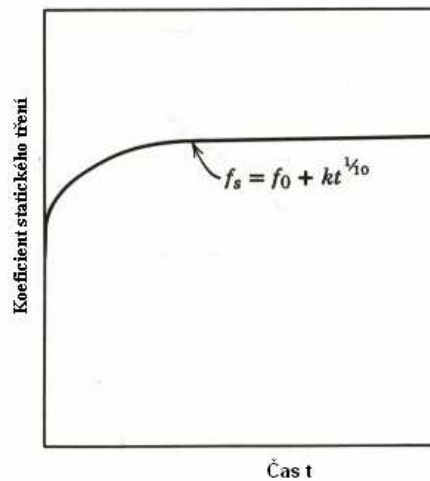
kde  $\mu$  je koeficient tření a  $N$  je kolmý tlak, tj. složka výsledné síly, kolmá k třecí ploše.

Koeficient tření je funkcí (zřejmě kromě jiných parametrů) rychlosti vzájemného pohybu obou těles (Obr.8.2 ). Jeho závislost na době, po kterou obě tělesa na sobě spočívají, je uvedena na Obr.8.3. Na Obr.8.4. je vynesena závislost síly tření na čase. Z obrázku plyne z praxe známá zkušenost: táhneme – li např. sáně po umrzlém sněhu, musíme nejdříve působit dosti velkou silou, než se dají do pohybu. Po překonání jisté maximální síly při níž se sáně daly do pohybu je síla, potřebná k jejich dalšímu pohybu již menší.

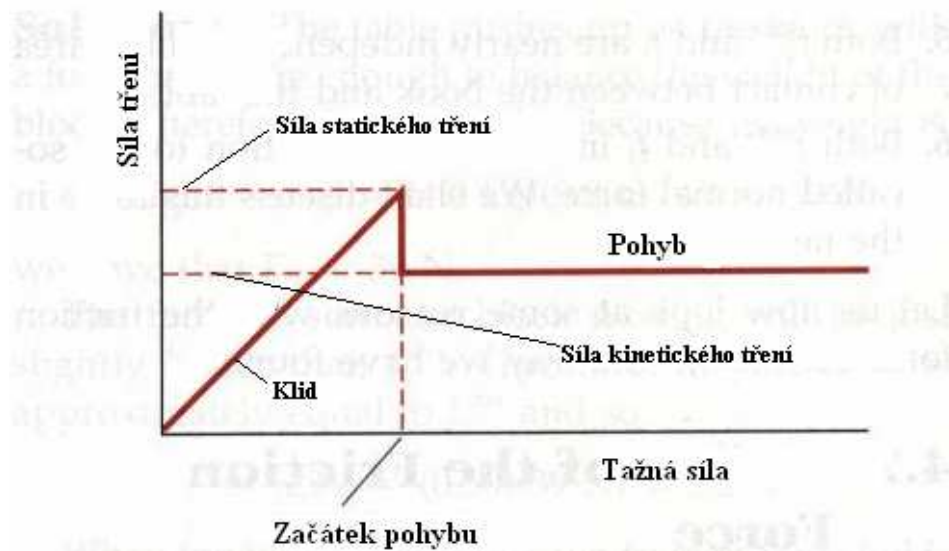
Obě uvedené závislosti lze kvalitativně vysvětlit pomocí tzv. *teorie mikrosvárů*. Základní myšlenka této teorie plyne z Obr.8.5., kde jsou schematicky znázorněny dva po sobě klouzající povrchy. Právě v místech, kde se vzájemně dotýkají „výstupky“ obou ploch, dochází k tak těsnému kontaktu, že atomy obou povrchů jsou tak blízko u sebe, že mezi nimi začnou působit meziatomové síly – vzniknou *mikrosváry*. V případě kovů je situace komplikována v důsledku přítomnosti heterogenní vrstvy, která vzniká na jejich povrchu v důsledku oxidace a technologického zpracování (Obr.8.6. ).



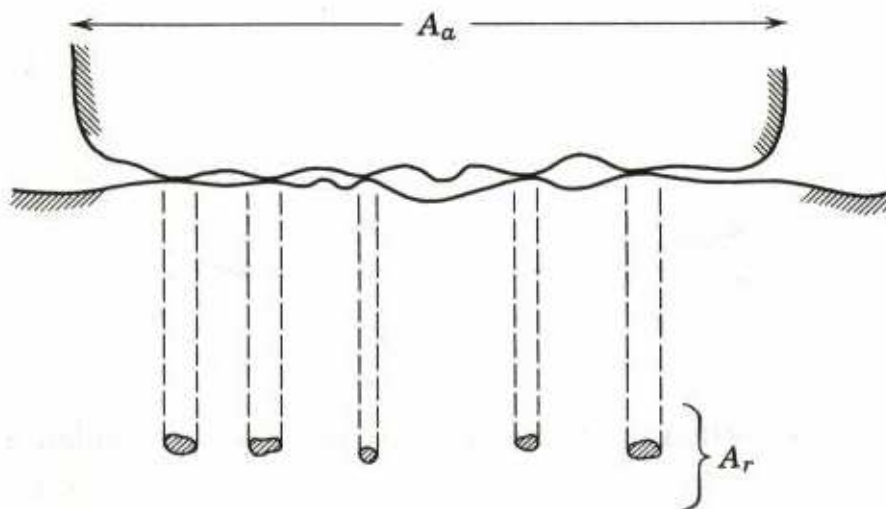
Obr.8.2. Závislost koeficientu tření na rychlosti pohybu.



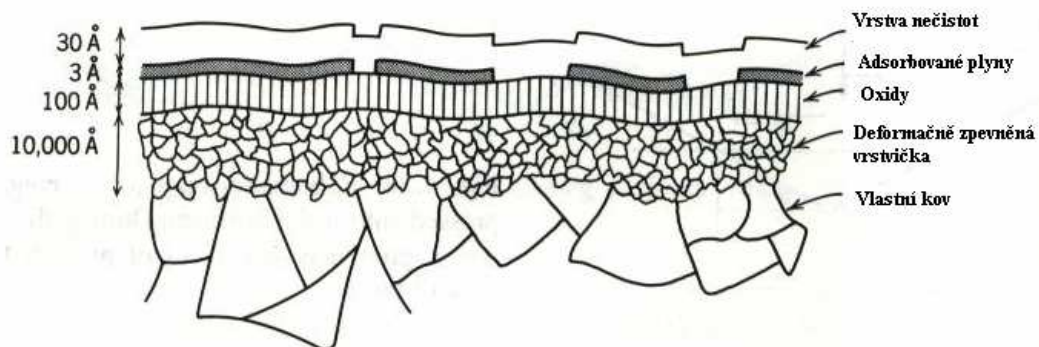
Obr.8.3. Závislost koeficientu tření na čase (do začátku pohybu)



Obr.8.4. Závislost síly tření (koeficientu tření) na tažné síle (čase).



Obr.8.5. Vzájemný vztah mezi skutečnou a zdánlivou třecí plochou.



Obr.8.6. Schematické znázornění složité situace na povrchu kovů.

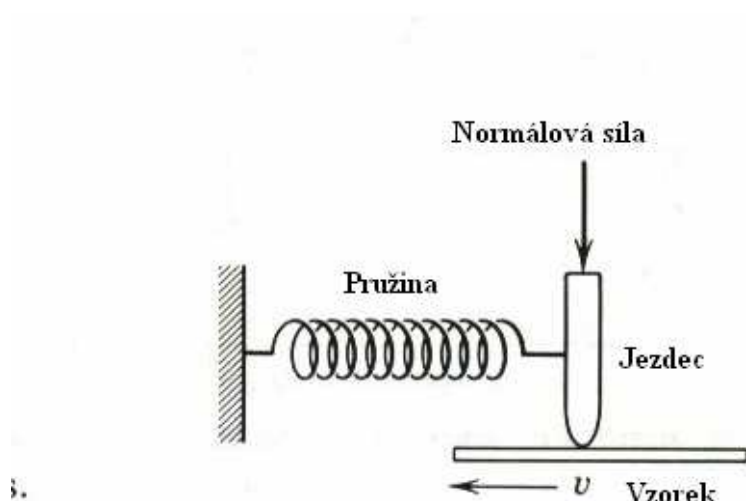
V Tabulce 8.1. jsou uvedeny koeficienty tření pro některé v praxi používané dvojice materiálů

Tab.8.1.

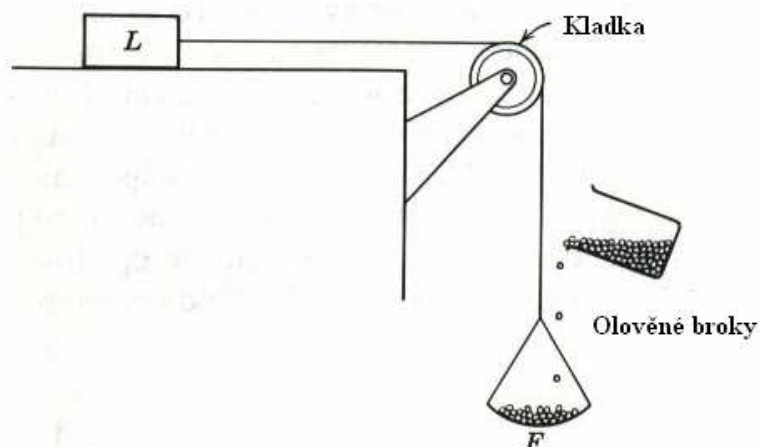
Materiál	$\mu$	Materiál	$\mu$
Dřevo – dřevo (suché)	0,40	Kov – kov (olej)	0,05
Dřevo – dřevo (namydlené)	0,20	Velmi dobře vyleštěné plochy	0,03
Kov – dubové dřevo (suché)	0,55	Ocel – achát (suché)	0,20
Kov – dubové dřevo (mokrý)	0,25	Ocel – achát (olej)	0,11
Kůže - dub	0,32	Ocel – křemen (suché)	0,50
Kůže – kov (suché)	0,56	Pneumatika – beton (suché)	0,70
Kůže – kov (mokrý)	0,36	Pneumatika – beton (mokrý)	0,25
Kůže – kov (olej)	0,15	Dřevo - kámen	0,40
Kov – kov (suché)	0,17	Teflon - teflon	0,07
Kov – kov (mokrý)	0,30	Nylon - nylon	0,25

## 8.2. Měření koeficientu tření.

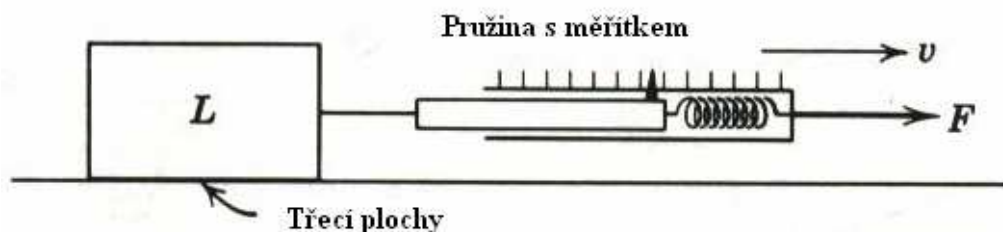
Koeficient tření  $\mu$  lze měřit různými metodami. Některé z nich jsou uvedeny na Obr. 7,8 a 7.9 a jejich princip je patrný z obrázků.



Obr.7. Měření koeficientu tření



Obr.8. Měření koeficientu tření

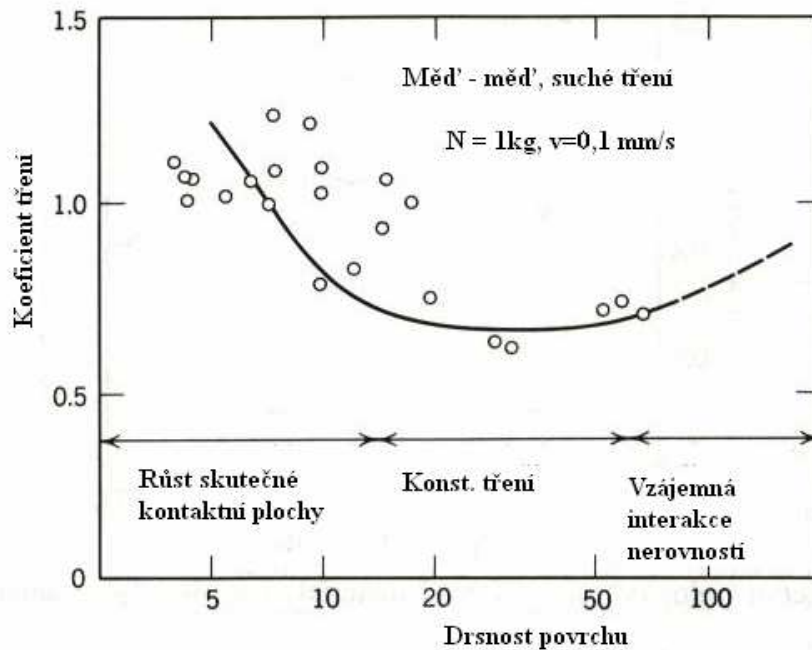


Obr.9. Měření koeficientu tření

Základní zákony suchého tření lze shrnout do několika bodů:

- Úměra mezi velikostí třecí síly a kolmým tlakem je důsledkem skutečnosti, že každá z obou veličin závisí na materiálových konstantách, charakterizujících obě kontaktní plochy, násobené toutéž hodnotou skutečné kontaktní plochy  $A_S$ .
- Nezávislost třecí síly na zdánlivé kontaktní ploše  $A_Z$  lze objasnit pomocí představy, že to je skutečná a nikoliv zdánlivá plocha, která řídí interakci mezi oběma tělesy. A tato skutečná plocha nezávisí na ploše zdánlivé.
- Poměrně slabá závislost třecí síly na rychlosti pohybu obou těles po sobě (Obr.8.2.) souvisí s malou závislostí mezi napětím a relativním prodloužením v plastické oblasti většiny materiálů. Tam, kde je tato závislost výraznější, je výraznější i závislost třecí síly na rychlosti pohybu.
- Slabá závislost třecí síly na drsnosti třecích ploch (Obr.8.10.) souvisí s tím, že nejvíce deformační práce se spotřebuje na vyvolání smykového posunutí výstupků na plochách (na rozdíl od mnohem menší práce, spotřebované na jejich vzájemné „obcházení“, tj. klouzání po sobě)



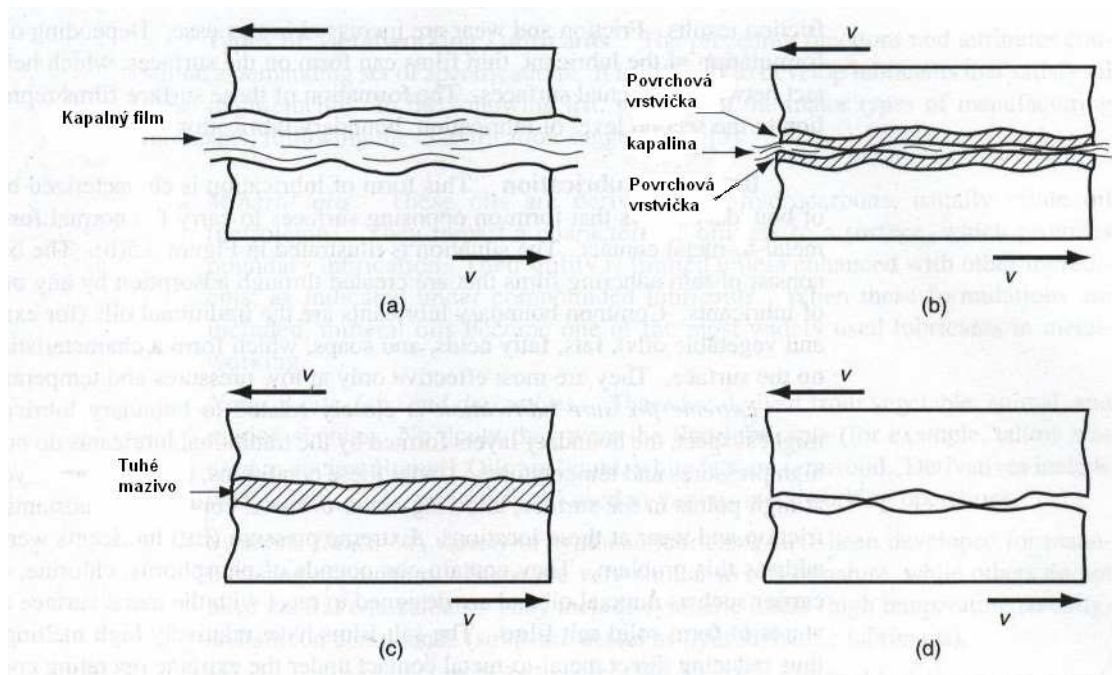


Obr.8.10. Závislost koeficientu tření na drsnosti povrchu.

### 8.3. Snížení tření mazáním.

Praxe nám ukazuje, že suché tření lze značně snížit, použijeme – li maziv. Způsoby mazání můžeme rozdělit do tří skupin:

- a) Mazání pomocí tenkého kapalného filmu. V ideálním případě takového mazání jsou obě třecí plochy vzájemně odděleny tenkou vrstvičkou vhodné kapaliny. Mezera mezi oběma plochami bývá velká ve srovnání s jejich drsností. Koeficient tření je v tomto případě dán vlastnostmi mazací kapaliny, zejména její viskozitou. Proto hovoříme o tzv. *hydrodynamickém mazání*. (Obr.8.11.)
- b) Mazání pomocí vytvoření povrchové vrstvičky. Tento způsob mazání spočívá ve vytvoření dvou povrchových vrstviček na obou třecích plochách tak, aby nedošlo ke vzájemnému kontaktu kovů. Zmíněné vrstvičky jsou vytvořeny pomocí adsorpce různých maziv (minerální či rostlinné oleje, tuky, mastné kyseliny, mýdla apod.). Tento způsob mazání se používá většinou při nižších teplotách a tlacích. Pro vysoké teploty a tlaky se tyto vrstvičky vytvářejí pomocí různých *aditiv*, přidávaných do minerálních olejů (fosfor, chlór a síra). Tak vzniknou poměrně pevné vrstvičky (soli), které mají vysokou teplotu tání a brání přímému kontaktu obou kovů mezi sebou.
- c) Mazání pomocí tuhých maziv. Mezi tuhá maziva řadíme grafit, siřník molybdenu a teflon. Tyto látky aplikujeme ve formě prášku, který přilne k oběma třecím plochám a chemicky s nimi reaguje. Posláním těchto maziv je oddělit od sebe obě třecí plochy prostředím s malým koeficientem tření. Tohoto způsobu mazání se používá při vysokých teplotách a tlacích a v agresivním prostředí, kde jsou jiné druhy maziv neefektivní.

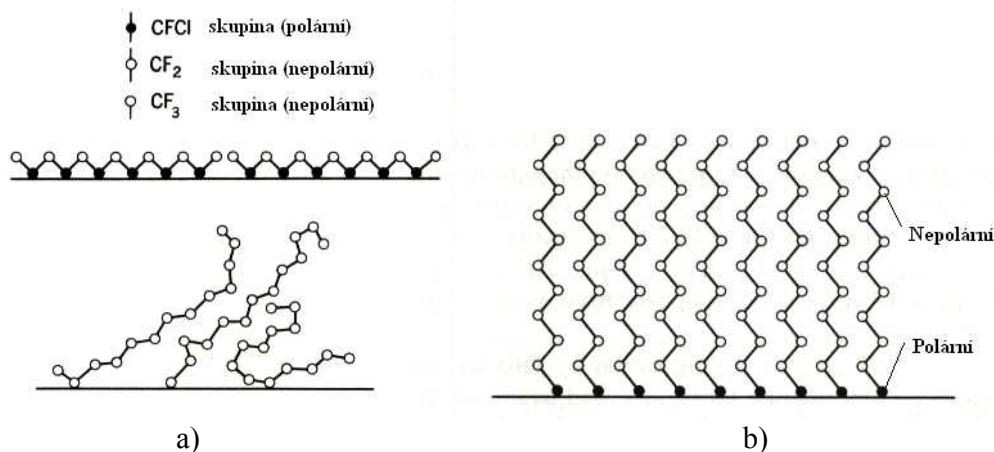


Obr.8.11. Základní principy mazání: a) hydrodynamické, b) pomocí adsorbovaných tenkých vrstviček, c) pomocí tuhých maziv, d) suché tření.

### **Konkrétní druhy maziv a jejich vlastnosti :**

- **Minerální oleje:** Vyrábějí se z ropy a vytvářejí na povrchu třecích ploch tenké povrchové vrstvičky. Jsou velmi rozšířené.
- **Rostlinné oleje, tuky a jejich deriváty:** Vyrábějí se z rostlin a zvířecích tuků. Patří k prvním používaným mazivům. Řadíme k nim i mýdla, tuky, vosky a mastné kyseliny.
- **Syntetická kapalná maziva:** Většinou jsou svojí strukturou podobné olejům. Patří sem syntetické estery a silikonové oleje. Používají se za vysokých teplot.
- **Kompozitní maziva:** Sem řadíme minerální oleje, doplněné tzv. aditivy, kterými jsou: (1) sloučeniny fosforu, síry a chlóru. (2) Pevné látky, jako grafit a siřník molybdenu. (3) Oxidační inhibitory. (4) Přidavky, zamezující pění. (5) Přidavky proti množení bakterií a jiných organismů.
- **Vodní maziva:** Voda je sama o sobě špatné mazivo, avšak přidáme – li do ní vhodné látky, můžeme ji k mazání použít, neboť má dobré chladicí schopnosti. Jako přísady můžeme použít olej (emulze s vodou), nebo i jiné speciální chemikálie, rozpustné ve vodě.
- **Povrchové vrstvy:** Povrchy třecích ploch lze pokrýt například (1) kovy (Zn, Sn apod.), které na nich vytvářejí plastické povlaky. (2) polymery (teflon). (3) skla (pro vysoké teploty).

Obecně lze říci, že nejlepší maziva mají takovou strukturu, že jejich molekuly jsou tvořeny dlouhými řetězci, ukončenými nenasycenou vazbou (která se naváže na jednu z ploch). Mazací účinek potom připomíná „klouzání“ po mokré trávě. (Obr.8.12)

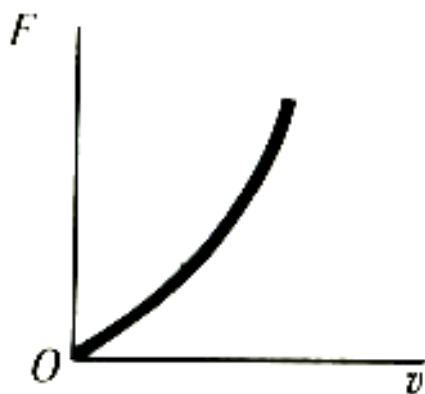


Obr.8.12. Princip mazání: a) nepříliš efektivní maziva, b) velmi dobrá maziva.

#### 8.4. Mokrý (vazký) tření.

Z předcházejícího odstavce plyne, že použití kapalin jako maziv značně snižuje tření obou třecích ploch. Názorně si to lze představit tak, že se po sobě již nepohybují obě plochy, ale tenké vrstvičky kapaliny (maziva) – tzv. *mokrý tření*. Podobně je tomu v případě, že se v nějaké kapalině pohybuje těleso (např. kulička o poloměru  $r$ ). V obou případech pozorujeme, že statické tření je nulové (obě třecí plochy se po sobě začnou pohybovat už při působení nepatrné síly). Je to rozdíl proti suchému tření, u kterého bylo třeba působit jistou (někdy dosti značnou silou), aby se tažené těleso dalo do pohybu (viz Obr. 8.4.).

Závislost síly mokrého tření na rychlosti je schematicky znázorněna na Obr. 8.13 .



Obr. 8.13. Schematická závislost síly mokrého tření na rychlosti.

Matematicky lze tuto závislost popsat Stokesovým vztahem

$$F_t = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = \beta \cdot v \quad (8.2)$$

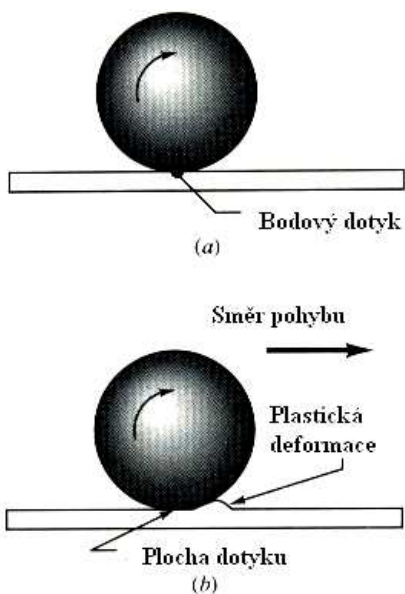
Kde  $\eta$  je vazkost kapaliny a  $r$  je charakteristický rozměr těles (poloměr kuličky, vzdálenost třecích ploch, apod.). Z Obr.8.13. plyne, že pro větší rychlosti se přímá úměrnost změny na kvadratickou závislost (Newtonův vztah):

$$F_t = C \cdot v^2 \quad (8.3)$$

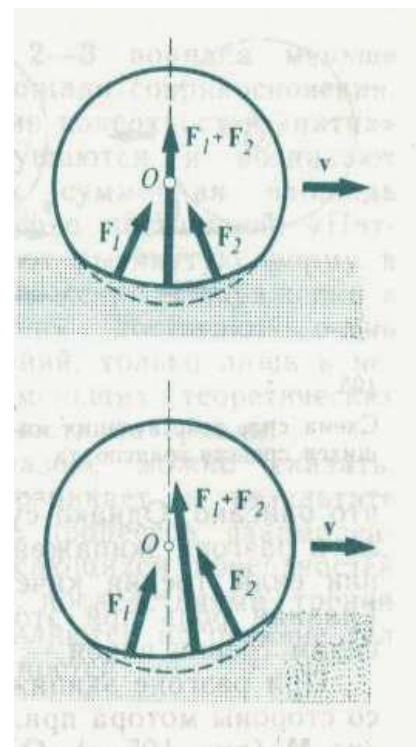
#### 8.4. Valivé tření.

V předcházejících odstavcích jsme si ukázali, že suché tření lze snížit např. výběrem vhodných materiálů pro třecí plochy, nebo mazáním. Další cestou je použití valivých ložisek, tj. přeměnou suchého nebo mokrého tření na tření valivé.

Při valivém pohybu pevného oblého tělesa (kuličky, válečku) po jiném pevném tělese, k němuž je oblé těleso přitlačováno nějakou silou (a navíc tlačeno ve směru, rovnoběžném s rovinou druhého tělesa), odporuje tomuto pohybu tzv. *tření valivé*. Fyzikální podstatu valivého tření lze objasnit pomocí Obr.8.14. a 8.15. Protože na kuličku (váleček) působí síla, která ji vtlačuje do podložky (a zároveň ji pohání jedním směrem, což je typické pro praktické využití jako kuličková nebo válečková ložiska), dojde k deformaci jak kuličky, tak i podložky. Pokud by tato deformace byla ideálně pružná, nevznikala by síla valivého tření. Celková síla, působící na kuličku, je podle tohoto obrázku rovna  $F = F_1 + F_2$  a momenty těchto sil vzhledem k ose kuličky se navzájem vyruší. Výslednice  $F$  je v rovnováze s vnější silou, působící na kuličku (zvětšenou o její tíhu). Nevzniká tedy žádná síla valivého tření.



Obr.8.14. K objasnění valivého tření.



Obr.8.15. Síly při valivém tření.

Protože je však ve skutečnosti tato deformace plastická (i když velmi malá), vzniká síla valivého tření a síly  $F_1$  a  $F_2$  budou různé, takže jejich výslednice bude mít složku vertikální i horizontální. Momenty obou sil mají opačný směr a nerovnajší se jeden druhému. Moment síly  $F_2$ , brzdící otáčení kuličky je větší, než moment síly  $F_1$ , který ji urychluje, takže výsledkem je zpomalování rotace kuličky a tedy vznik valivého tření.

Síla valivého tření je tedy důsledkem nepružného charakteru deformace kuličky (válečku) a povrchu ložiska v okolí jejich vzájemného kontaktu. Vztah pro sílu valivého tření má tvar

$$T_v = \frac{\mu_v}{r} N \quad (8.4)$$

( $\mu_v$  je koeficient valivého tření,  $r$  je poloměr kuličky a  $N$  je kolmý tlak, který na ni působí). Hodnota koeficientu valivého tření  $\mu_v$  (v cm) je vždy menší, než je koeficient suchého tření, například (viz Tab.8.2):

Dvojice materiálů	$\mu_v$ (cm)
Tvrdé dřevo – tvrdé dřevo	0,05
Ocel - ocel	0,005
Ocelové kuličky v ložiskách	0,0005 – 0,001

Odtud vidíme, jak je vhodné převádět suché i mokré tření na tření valivé; (je –li to možné).

Zákony valivého tření lze opět shrnout do několika bodů:

- Síla valivého tření je rovna mocnině zatěžovací síly. Pro malá zatížení, kdy je deformace kuličky i podložky prakticky pouze pružná, je exponent mocniny  $\sim 1,3$ . Pro velká zatížení, kdy již plastická deformace na styku kuličky a plochy není zanedbatelná je exponent větší, dosahuje až hodnot 2,0.
- Síla valivého tření je nepřímo úměrná poloměru křivosti kuličky (válečku).
- Síla valivého tření je tím menší, čím hladší jsou oba povrchy (kuličky i povrchu ložiska).



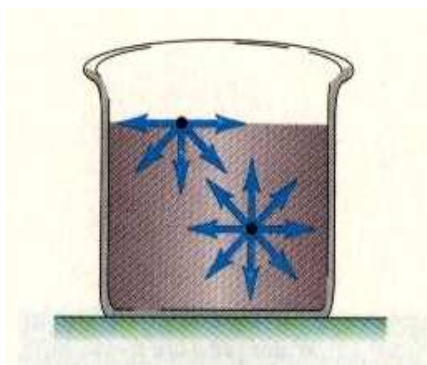
## 9. Povrchové napětí kapalin. Povrchová energie pevných látek. Tekuté krystaly.

### 9.1. Povrchové napětí kapalin.

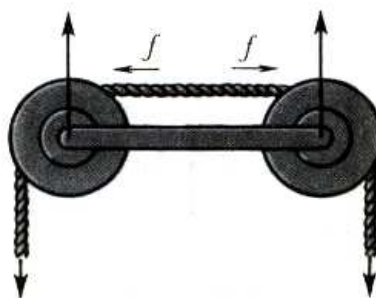
Kapalné skupenství látek je s jedné strany ohraničeno skupenstvím pevným a s druhé strany skupenstvím plynným. Proto je přirozené očekávat, že kapaliny budou mít vlastnosti a strukturu, nacházející se někde mezi uspořádanými pevnými látkami a chaotickými plyny. Hustota kapalin se příliš neliší od hustoty pevných látek (kde se atomy nacházejí v těsné blízkosti) a proto i v kapalinách budou tyto částice (atomy nebo molekuly) dosti blízko u sebe, ale přitom nebudou na sebe vázány tak velkými silami jako v pevných látkách (proto kapaliny nemají stálý tvar), ale přesto ještě dosti velkými (takže kapaliny udržují svůj objem).

Podle Frenkela připomíná pohyb částic v kapalinách pohyb kočovníků: částice poskočí o malý úsek, chvíli kmitá na místě a opět poskočí náhodným směrem a zase kmitá, atd.

Vydeme-li tedy z tohoto kvalitativního modelu kapaliny a vybereme-li si jednu částici uvnitř kapaliny, můžeme říci, že výslednice meziatomových (nebo mezimolekulárních) sil, které na ni působí, je nulová. Zcela jinak je tomu blízko povrchu a na povrchu kapaliny. Tam je výslednice sil, působících na částici nenulová a směřuje dovnitř kapaliny (Obr.9.1). Situace je tedy taková, jakoby byla kapalina stlačena silou, působící směrem dovnitř kapaliny. Ta síla je, ač se to na první pohled nezdá, značná – kapalina je stlačena tak, že se jeví navenek jako téměř nestlačitelná. Jinými slovy to znamená, že na povrchu kapaliny je něco, co připomíná tenkou elastickou blanku, snažící se co nejvíce zmenšit svůj povrch (Obr.9.2).



Obr.9.1. Ke vzniku síly povrchového



Obr.9.2. Směr síly povrchového napětí

Například v beztížném stavu zaujme pod vlivem této síly kapalina tvar koule (při daném objemu má minimální povrch). Stejně je tomu i v případě, že výslednice sil, působících na kapalinu, je nulová (Obr.9.3.)



Obr.9.3. Tvar povrchu kapaliny v beztlížném stavu (po dopadu kapičky na povrch kapaliny vznikne v jistém kratičkém časovém intervalu tento tvar povrchu kapaliny. Síla tíhová je zde rovna síle setrvačné směrem nahoru a dochází pro tuto chvíli k beztlížnému stavu. Jedinou silou, působící na kapičku, je síla povrchového napětí).

Povrchové napětí je definováno jako síla  $dF$ , působící na jednotku délky povrchu  $dl$  (tečně k povrchu kapaliny)

$$\sigma = \frac{dF}{dl} \quad (7.1)$$

Nebo jako energie  $dE$  jednotky povrchu kapaliny  $dS$

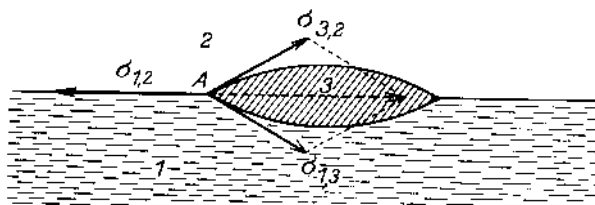
$$\sigma = \frac{dE}{dS} \quad (7.2)$$

(v tomto případě se jedná o tzv. *volnou energii*, definovanou v termodynamice pomocí vztahu  $dE = -S.dT - p.dV$ , kde  $S$  je entropie soustavy, charakterizující její uspořádání a  $p$ ,  $T$  a  $V$  jsou její tlak, teplota a objem. Dochází-li ke změně povrchu kapaliny izotermicky, je teplota konstantní a tedy  $dT = 0$  a změnu objemu lze snadno převést na změnu povrchu)

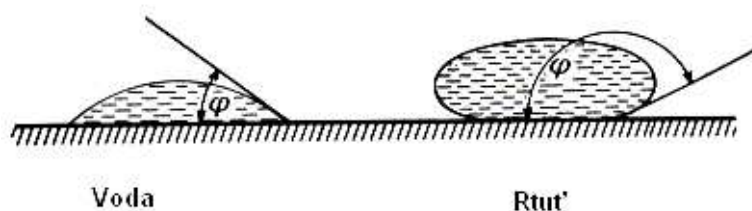
Povrchové napětí kapalin závisí na více parametrech (to plyne z Obr.9.1.) Bude záviset na kvalitě přechodu kapalina – plyn i na prostředí nad kapalinou, tedy zřejmě na hustotě obou prostředí, teplotě, tlaku čistotě kapaliny, apod.:

$$\sigma = f(T, p, \rho, \text{čistota, tenze par, ....}) \quad (7.3)$$

Obdobu povrchového napětí kapalin mají i pevné látky (ztuhnutím by se nemělo nic příliš měnit na kvalitativním Obr.9.1). V případě pevných látek se povrchové napětí nazývá povrchovou energií pevných látek. Proto můžeme kvalitativně i kvantitativně objasnit tvar povrchu kapaliny na rozhraní tří prostředí, pevného, kapalného a plynného, stejně jako tvar kapiček jedné kapaliny na povrchu druhé (nejsou-li navzájem rozpustné), nebo na povrchu pevné látky. Některé z těchto případů jsou uvedeny na Obr.9.4 a 9.5.



Obr.9.4. Tvar kapiček jedné kapaliny na kapalině druhé.



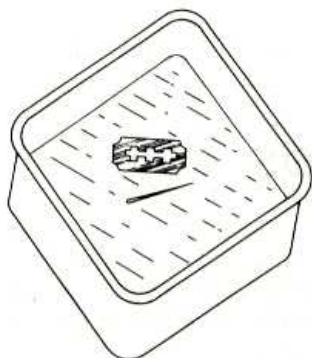
Obr.9.5. Tvar kapiček kapaliny na pevném povrchu (např. skle).

## 9.2. Výskyt a využití povrchového napětí.

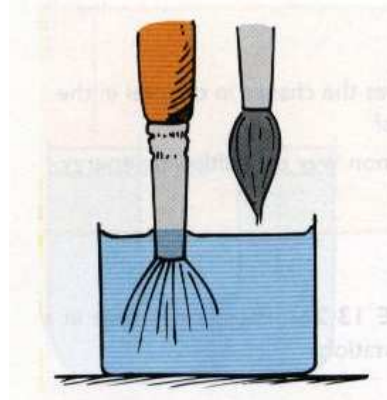
Jevy povrchového napětí pozorujeme téměř všude v přírodě kolem nás a nacházejí využití v mnoha odvětvích lidské činnosti, v chemii, biologii, v domácnosti, průmyslu, zemědělství, atd. Uvedeme přehled alespoň některých z nich:

- Využití v chemii: jevy povrchového napětí jsou podstatou celých odvětví chemie, jako je např. koloidní chemie, chromatografie, vysvětluje vlastnosti povrchově aktivních látek a katalyzátorů, atd.
- Využití v biologii: povrchové napětí vysvětluje mnoho jevů, souvisejících s činností buněk, stejně jako kapilární jevy v rostlinách, atd.
- Využití v domácnosti: mytí, praní, holení, jsou činnosti, které mají společnou podstatu. Jde o umožnění smáčení nečistot a tím jejich odstranění. Studená voda má vysoké povrchové napětí a tak abychom ji mohli použít k výše uvedeným činnostem, musíme toto napětí snížit (ohřátím, přidáním látek, snižujících povrchové napětí – mýdla, saponátů apod.).
- Využití v zemědělství: aby bylo možno správně aplikovat herbicidy a insekticidy, je třeba upravit vhodně povrchové napětí postřiků (aby buď ulpěly, nebo neulpěly na daném druhu rostliny – kulturní či plevelné)

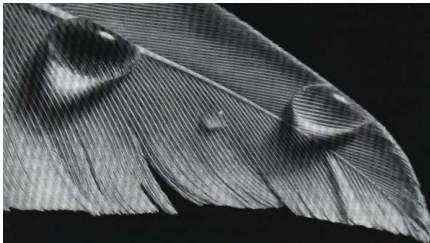
- e) Využití v průmyslu: technologický postup, zvaný *flotace* spočívá v oddělování hlušiny od těžené látky (železa, zlata apod.). Kapalina s vhodně upraveným povrchovým napětím (voda + saponát) způsobí, že hlušina bude smáčena a klesne ke dnu a nemáčená látka, na níž se vytvoří vzduchové bublinky vyplave na hladinu. Fyzikální podstata *broušení* je založena na skutečnosti, že vhodná kapalina sníží povrchové napětí broušených či obráběných látek. Chceme-li například vrtat otvor ve skle, lze to provést s úspěchem pod vodou (sklo se však musí pečlivě odmastit).
- f) Přírodní jevy: existence povrchového napětí vysvětluje takové jevy, jako je pohyb drobného hmyzu po vodní hladině, „plavání“ drobných předmětů (žiletka, jehla, hliníková mince) na hladině vody (Obr.9.6.), jaká síla způsobí změnu tvaru špičky štětce po namočení, apod.(Obr.9.7.). Rovněž objasní důvod, proč voda nepronikne peřím vodních ptáků a ti mohou snadno plavat po vodní hladině (Obr. 9.8). a naopak důvod, proč se tyto ptáci utopí, když je zasáhne ropná skvrna na hladině. I tvar kapek rosy na listech a květech rostlin souvisí s povrchovým napětím vody (Obr.9.9.). Velkou většinu meteorologických jevů lze také objasnit povrchovým napětím vody (elektrický náboj v bouřkových mracích, tvar vodních kapek, vznik krup, apod.).



Obr.9.6. Drobné kovové předměty „plavou“ na povrchu kapaliny díky povrchovému napětí.



Obr.9.7. Síla povrchového napětí stáhne po namočení štětec do špičky.



Obr.9.8. Kapičky vody na ptačím peří.

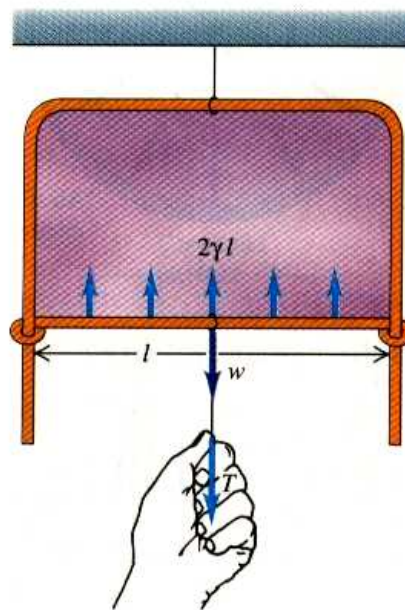


Obr.9.9. Kapičky vody na nesmáčivém povrchu okvětních lístků růže.

### 9.3. Měření povrchového napětí.

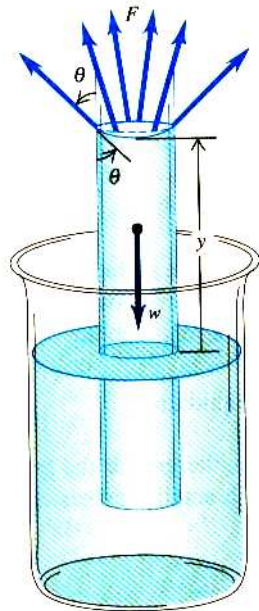
Povrchové napětí lze měřit buď metodami přímými, nebo nepřímými:

- a) Přímá metoda, vycházející z definice: tato metoda vychází ze vztahu (9.1) a Obr.9.10. Do měřené kapaliny ponoříme tělísko definovaného tvaru o známé délce a měříme sílu, potřebnou k vytažení tělíska z kapaliny.

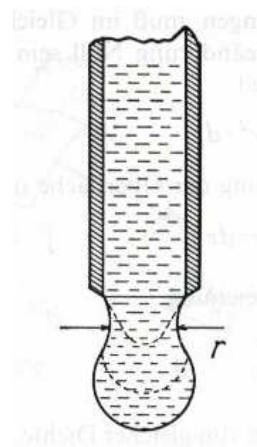


Obr.9.10. Princip přímé metody měření povrchového napětí.





Obr.9.11. Metoda ze vzestupu v kapiláře.



Obr.9.12. Kapková metoda.

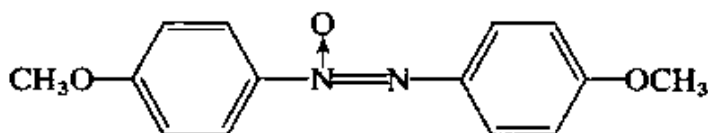
- b) Metoda, využívající vzestupu v kapiláře: z Obr.9.11. plyne, že síla povrchového napětí je v rovnováze s tíhou sloupce kapaliny. Toho lze využít k měření povrchového napětí kapalin (je třeba změřit hustotu kapaliny a poloměr kapiláry).
- c) Metoda kapková: necháme-li odkapávat kapalinu z tenké trubičky (Obr.9.12.), můžeme tvrdit, že kapička odkápne tehdy, když je síla tíhová rovna síle povrchového napětí, působící na obvodu kapiláry. Skutečnost je však taková, že kapička neodpadne celá a část jí zůstane na konci kapiláry. Proto tuto metodu užíváme jako metodu relativní, tj. srovnáváme tíhu určitého počtu kapek neznámé kapaliny se stejným počtem kapiček kapaliny se známým povrchovým napětím (a předpokládáme, že zbytek kapaliny, který neukápl, je stejný pro obě kapaliny).

## 9.4. Tekuté krystaly.

Na přelomu 19. a 20. století zjistil Rakouský biolog Reinitzer při zahřívání různých pevných látek až nad bod tání, že vzniklá kapalina je zprvu neprůhledná (opalizuje) a teprve při dalším zahřívání se od jisté teploty změní na průhlednou kapalinu. Stručně řečeno, některé látky mají dva body tání. Se svým pozorováním se svěřil svému příteli fyzikovi Lehmannovi, který se tomuto problému intenzivně věnoval a nazval tyto látky „mezofáze“ (později *parakrystaly*, *kapalné krystaly*, *tekuté krystaly*). Zjistil, že tyto krystaly lze získat rozpouštěním v rozpouštědle (*lyotropní* tekuté krystaly), nebo roztavením (*termotropní* tekuté krystaly).

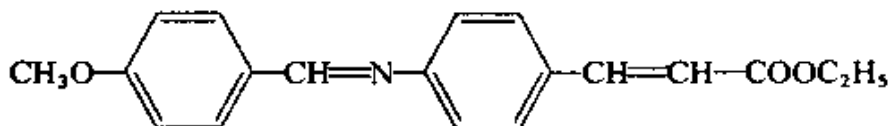
Příklad tekutých krystalů:

*P – azoxyanisol*



Oblast výskytu fáze tekutých krystalů: < 357 K – 423 K >.

*Ethylester p – anisalaminoskořicové kyseliny*

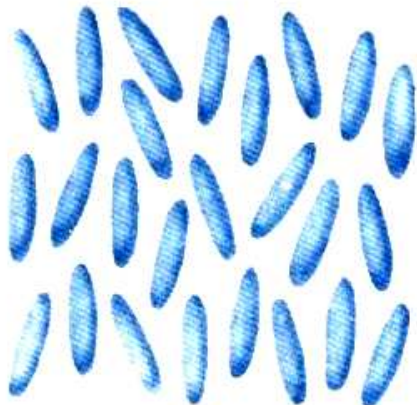


Oblast výskytu fáze tekutých krystalů: < 356 K – 412 K >.

### 9.4.1. Struktura tekutých krystalů.

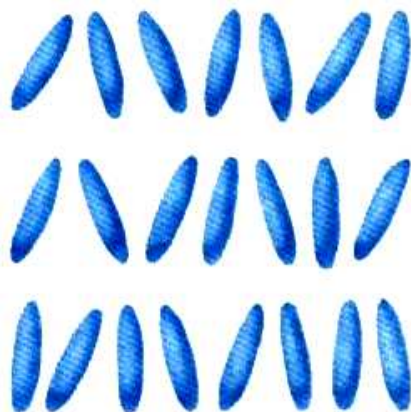
Obecně se dá říci, že tekuté krystaly se vyskytují u látek, které mají nesymetrické, protáhlé molekuly, tedy u látek organických. Takové dlouhé molekuly lze uspořádat tak, že jsou uloženy v trojrozměrné krystalové mřížce, uspořádané ve všech třech směrech (pak se jedná o pevnou fázi). Dále je lze uspořádat ve dvou směrech, nebo v jednom směru (to se jedná o tekuté krystaly). Jsou-li neuspořádané, mají strukturu typických kapalin. Proto se přímo nabízí rozdělení tekutých krystalů podle stupně uspořádání na:

a) Nematické tekuté krystaly (název pochází od řeckého slova νεμα = nit). Tyto tekuté krystaly jsou uspořádány v jednom směru (samozřejmě díky tepelnému pohybu jsou ze svého směru stále vychylovány – Obr.9.13.).

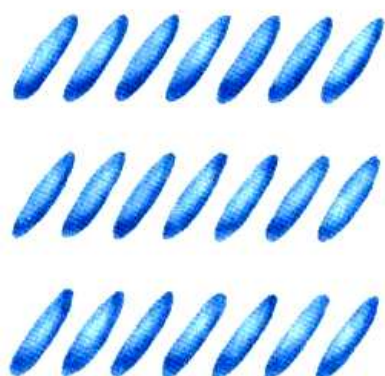


Obr. 9.13. Struktura nematických tekutých krystalů.

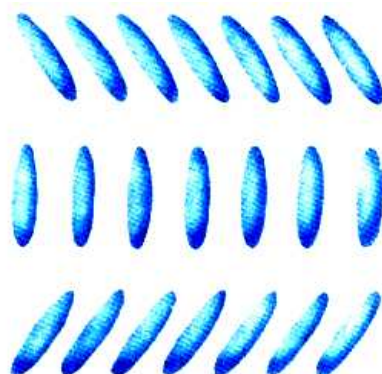
b) Smectické tekuté krystalý (σμεγμα = mýdlo). V případě těchto tekutých krystalů existuje uspořádání ve dvou směrech, tj. molekuly jsou uspořádány ve vrstvách (Obr. 9.14a,b,c..). Mezi vrstvami se u lyotropních tekutých krystalů nachází kapalina, v níž jsou rozpuštěny. Z obrázků je vidět, že podélné osy molekul v jednotlivých vrstvách mohou být orientovány různým směrem. Odtud plyne, že takové krystalý jsou určitě opticky aktivní (stáčejí polarizační rovinu – to můžeme pozorovat např. u šampónu).



Obr.9.14a. Struktura smectických tekutých krystalů.

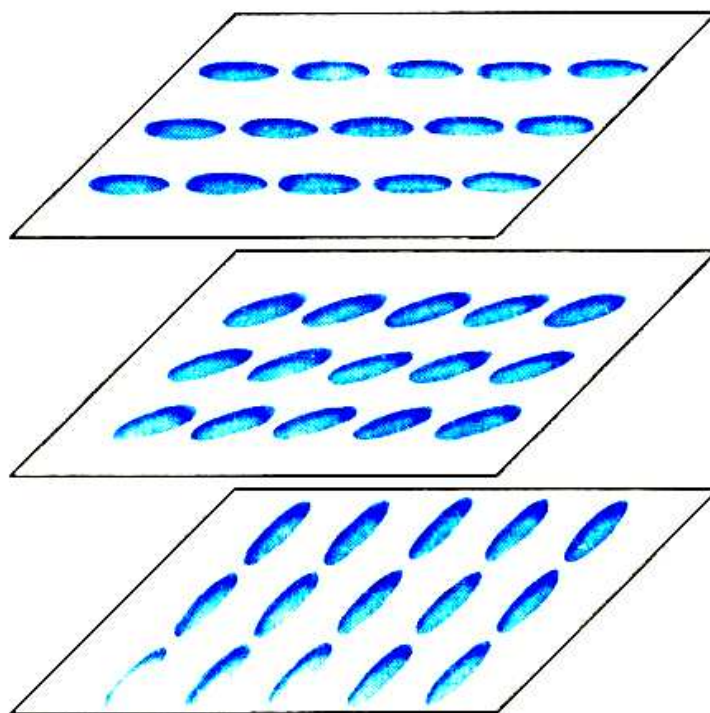


Obr.9.14.b. Příklad orientace smektických tekutých krystalů.



Obr.9.14c. Příklad orientace smektických tekutých krystalů.

c) Cholesterické tekuté krystaly: Z Obr.9.15. plyne, že cholesterické tekuté krystaly jsou uspořádány v jednotlivých rovinách tak, že v každé z nich jsou podélné osy molekul rovnoběžné a v sousedních rovinách jsou vždy trochu pootočené. Cholesterické tekuté krystaly jsou opticky aktivní i tenká vrstvička těchto krystalů značně stáčí polarizační rovinu.



Obr.9.15. Cholesterické tekuté krystaly.

- d) *Diskotické tekuté krystaly*: Struktura těchto krystalů připomíná hromádku mincí (molekuly jsou ploché, mají tvar disků).

#### **9.4.2. Vlastnosti a využití tekutých krystalů.**

Významnou vlastností tekutých krystalů je skutečnost, že jsou velmi citlivé na změnu fyzikálních polí (kromě gravitačního), na změnu teploty, chemické látky apod. Tato citlivost se projevuje ve změně struktury a lze ji indikovat opticky (již zmíněným stáčením polarizační roviny, průhledností, barvou apod.). Například citlivosti na teplotu se využívá v lékařství (měření malých změn teploty kůže). Citlivosti na změnu elektrického pole se využívá při konstrukci displejů a obrazovek s tekutými krystaly. Citlivosti na chemické látky se využívá při konstrukci přístrojů, umožňujících měřit přítomnost malého množství různých látek (např. kokainu a jiných drog).

Živé organismy jsou ve své postatě tekutými krystaly (rostlinné tkáně, kosti, svaly) a důvodem toho, že život na Zemi vznikl na bázi tekutých krystalů je právě jejich citlivost na změny vnějších podmínek (která je hybnou silou evolučního vývoje).



## 10. Získávání a měření nízkých tlaků.

Jednotky tlaku:

$$1 \text{ Pa} = \text{N} / \text{m}^2$$

$$1 \text{ at} = \text{kp} / \text{cm}^2 = 0,9807 \cdot 10^5 \text{ Pa (technická atmosféra)}$$

$$1 \text{ b} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ torr} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa (fyzikální atmosféra)}$$

$$1 \text{ torr} = 1,3332 \cdot 10^2 \text{ Pa} = \text{tlak 1 mm sloupce Hg.}$$

V dalším budeme užívat jednotek torr (v této oblasti názornějších a tradičních).

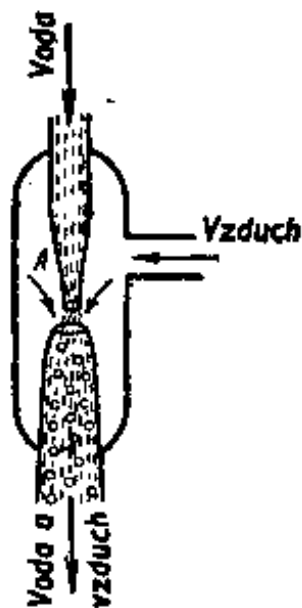
Důvody vytváření vakua:

- volný pohyb částic,
- odstranění zejména chemického vlivu plynu při technologických postupech.

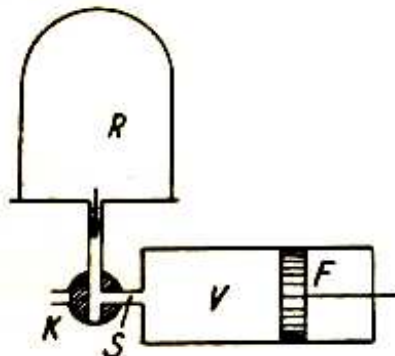
### 10.1. Vývěvy.

#### 10.1.1. Vodní vývěva, vývěva pístová.

Princip: Bernoulliho rovnice, rovnice kontinuity.



Obr.10.1. Vodní vývěva



Obr.10.2. Pístová vývěva.  
(R – recipient)

## Pístová vývěva.

Princip činnosti:

$$p_1(V_R + V) = b \cdot V_R \quad (1)$$

odtud

$$p_1 = \frac{V_R}{V_R + V} b = k \cdot b \quad (2)$$

kde  $V_R$ , resp.  $V$  jsou objemy recipientu, resp. válce vývěvy  
Při druhém nasátí máme pro tlak  $p_2$  hodnotu

$$p_2 = \frac{V_R}{V_R + V} p_1 = k \cdot p_1 = k^2 \cdot b \quad (3)$$

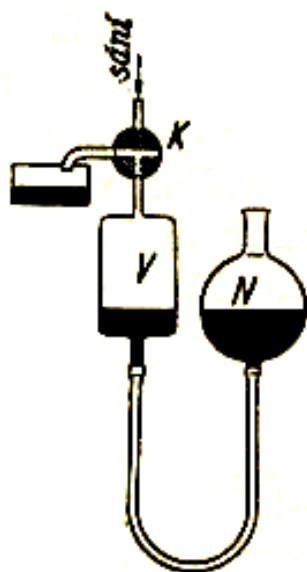
Po  $n$  nasátích máme tedy

$$p_n = k^n \cdot b \quad (4)$$

Zředování je limitováno velikostí škodlivého prostoru  $S$ . Zředování plynu v recipientu ustane v tom okamžiku, jakmile bude tlak recipientu  $p_R$  právě roven tlaku ve válci, vzniklém rozepnutím části vzduchu ve škodlivém prostoru (který má při spojení s vnější atmosférou tlak, rovný  $b$ ):

$$V_S \cdot b = (V_S + V) p_R, \quad p_R = \frac{V_S}{V_S + V} b \quad (5)$$

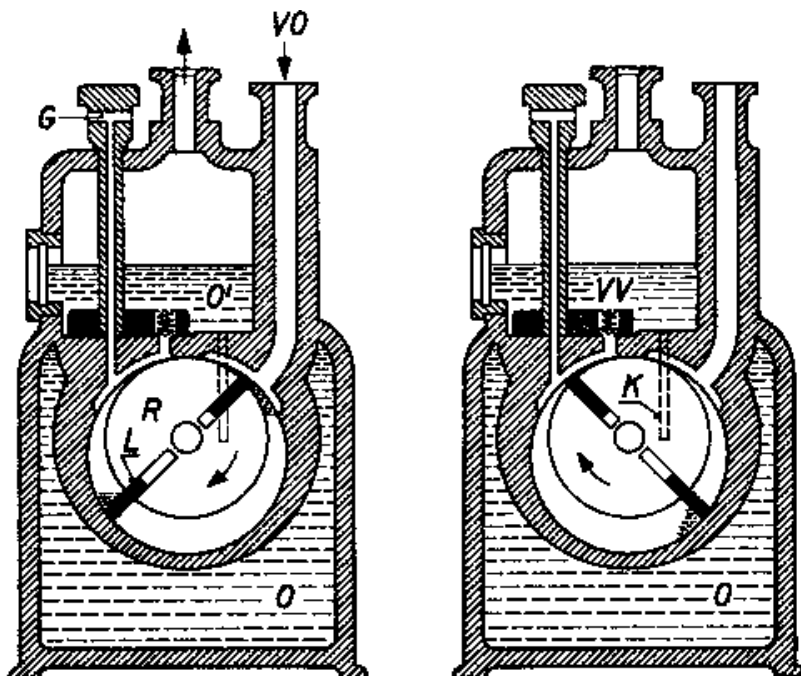
Kde  $V_S$  je objem škodlivého prostoru a  $p_R$  je nejnížší dosažitelný tlak v recipientu (ukazuje se, že to je max. 1 torr). Pro dosažení vyššího vakua používáme vícestupňových pístových vývěv, nebo rtuťové vývěvy Geisslerovy, kde je pevný píst nahrazen pístem rtuťovým, který zaplní i škodlivý prostor.



Obr.10.3. Geisslerova rtuťová vývěva.

### 10.1.2. Vývěvy, založené na principu přenosu.

#### Rotační vývěvy



Obr.10.4. Lopatková rotační vývěva (L – lopatka, K – kanálek pro cirkulaci oleje, O – náplň oleje, O' - kontrolní okénko, R – rotor, VO – vstupní otvor, VV – výstupní ventil, G – vstupní ventil)..

Princip činnosti těchto vývěv: periodické zvětšování a zmenšování činného prostoru vývěvy. Patří sem Lopatková vývěva. Rotační olejová vývěva – olej je zde kvůli těsnosti aparatury a mazání.

Čerpací rychlost rotační vývěvy:

$$S = f(v + x) \quad (6)$$

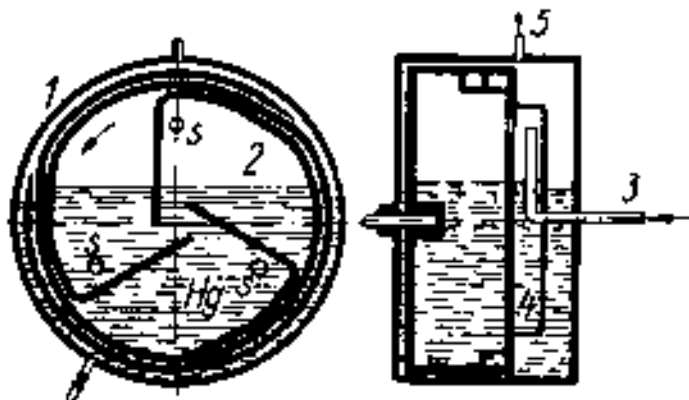
kde  $f$  je frekvence otáčení rotoru,  $v$  je činný objem a  $x$  je škodlivý prostor (prostor pod výstupním ventilem).

Mezní tlak:

$$p_0 = \frac{x}{v + x} b \quad (7)$$

$b$  je barometrický tlak.

Jiný typ rotační vývěvy: Gaedeova rtuťová vývěva



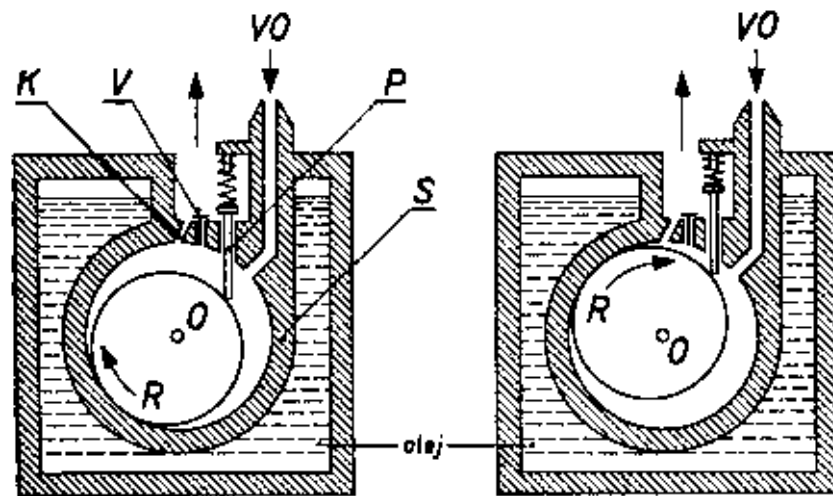
Obr.10. 5. Gaedeova rtuťová rotační vývěva (1 – plášť, 2 – buben se třemi komorami, 3 – sací trubice, s – sací otvory v komorách, 4 – sací buben, 5 – k předčerpacím vývěvám.

### Rotační vývěvy s kolujícím rotorem

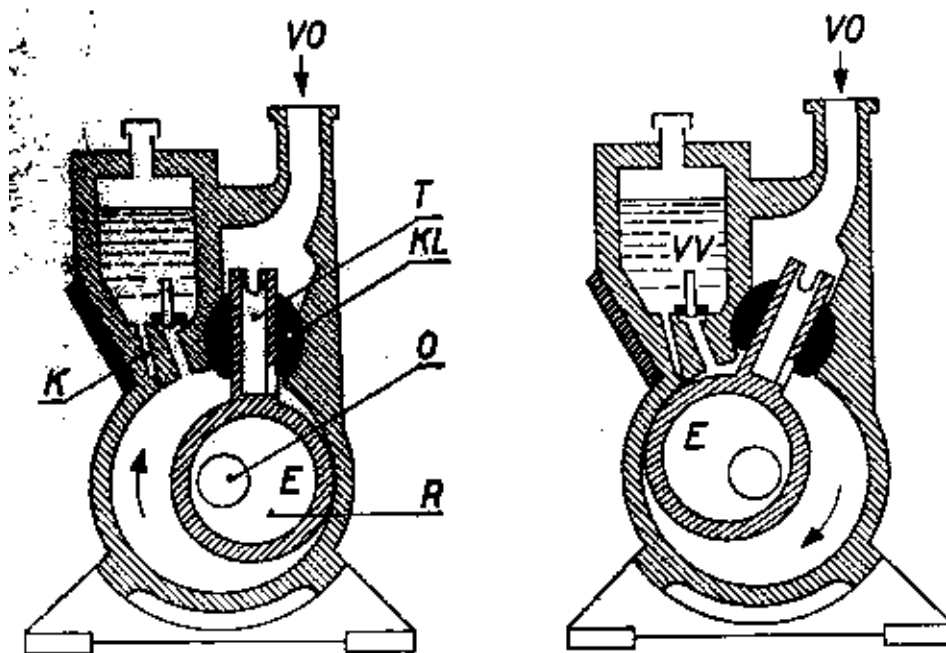
„kolování“ – rotor se dotýká při svém pohybu vnitřních stěn v různých místech.

Rotační vývěvy se konstruují obvykle jako dvoustupňové

Olej do rotačních vývěv: mazání, těsnění – nutná vhodná viskozita a nízká tenze par. Protože se v něm rozpouštějí čerpané plyny, dochází často k degradaci oleje a korozi součástí vývěv.



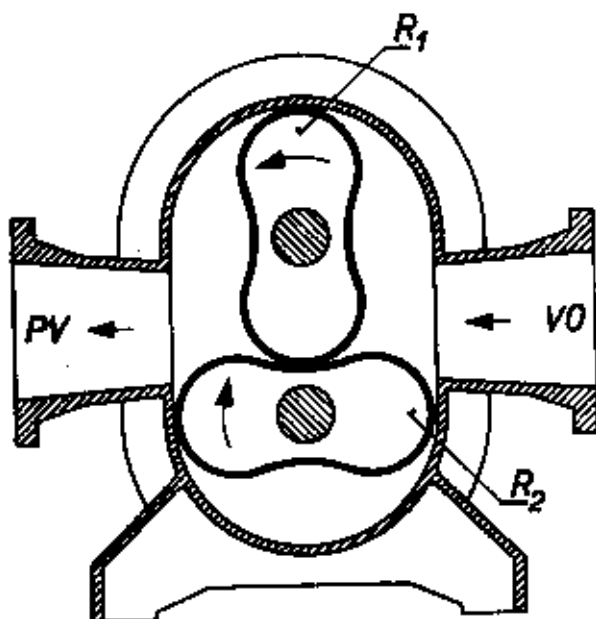
Obr.10. 6. Vývěva s kolujícím rotorem a přepážkou (R – rotor, K – kanálek pro cirkulaci oleje, VO – vstupní otvor, V – výstupní ventil, O – osa rotoru, P – posuvná přepážka, S – satorová komora).



Obr.10.7. Vývěva s kolujícím rotorem a čtyřhrannou trubicí (R – rotor, E – excentr, O – osa excentru, T – čtyřhranná trubice s otvorem, KL – kloub, K – kanálek pro cirkulaci oleje, VV – výstupní ventil, VO – vstupní otvor).



## Rootsova vývěva



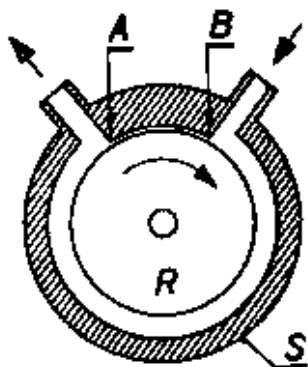
Obr.10.8. Rootsova vývěva ( $R_1$ ,  $R_2$  – rotory, PV – výstupní otvor, VO – vstupní otvor).

Plyn se v této vývěvě nestlačuje, pouze posouvá. Rotory se o sebe netrou, není je tedy třeba mazat. Frekvence rotace – až tisíce otáček za minutu.

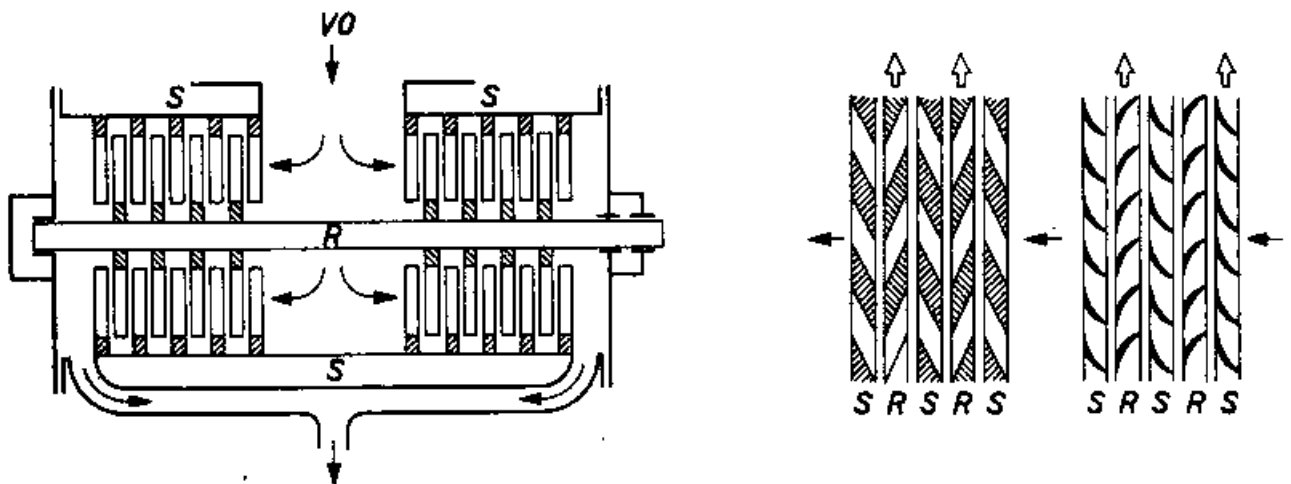
Velká čerpací rychlost. Jako předstupeň vyžadují rotační vývěvy. Jsou citlivé na vniknutí nečistot => jsou nutné filtry (ale tím se sníží čerpací rychlost).

Mezní tlak: až  $10^{-5}$  torr (dvoustupňová vývěva)

## Turbomolekulární vývěvy



Obr.10.9. Molekulární vývěva (R – rotor, S – plášť vývěvy).



Obr.10.10. Turbomolekulární lopatková vývěva s dvěma typy lopatek (R – rotor, S – stator, VO – vstupní otvor).

Velká rychlost otáčení rotoru – až  $10^4$  ot./min.

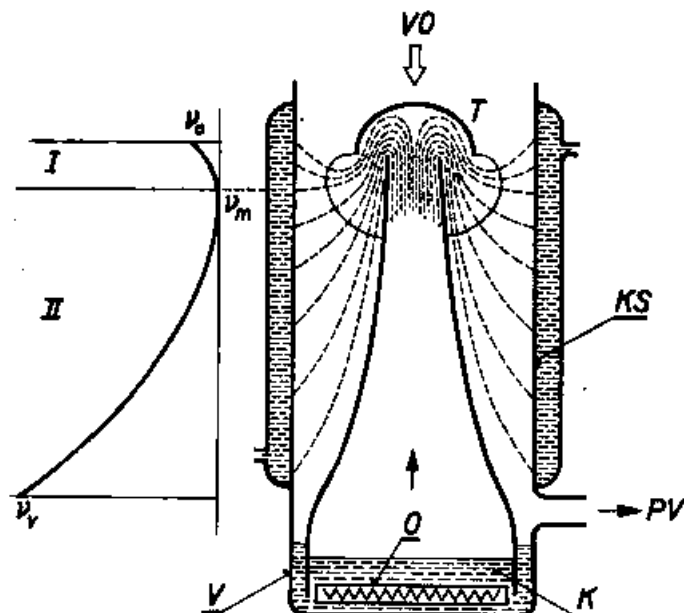
Molekuly získají impuls ve směru rotace

Jsou náročné na přesnost opracování součástí a choulostivé v provozu.

Mezní tlak max.  $10^{-7}$  torr (nelze je odplynit zahřátím na vysokou teplotu).

Úpravou rotoru do tvaru kotoučů s lopatkami (statory mají lopatky orientované naopak) se uvedené nedostatky odstraní, tj. lze je zahřát a odplynit. Tak lze dosáhnout mezního tlaku až  $10^{-11}$  torr.

Mají velkou čerpací rychlost, neobsahují olej => žádná tenze par oleje.



Obr.10.11. Difúzní vývěva (VO – vstupní otvor, T – tryska, KS – kondenzační stěna, PV – k pomocné vývěvě, V – varník, K – pracovní kapalina, O – topné tělísko, V levé části obrázku je znázorněna koncentrace čerpaného plynu na souřadnici, proložené osou vývěvy).

### Difúzní vývěvy

Princip opět stejný – sdílení impulzu mezi molekulami čerpaného plynu a rychle se pohybujícím proudem par oleje (nadzvukovou rychlostí).

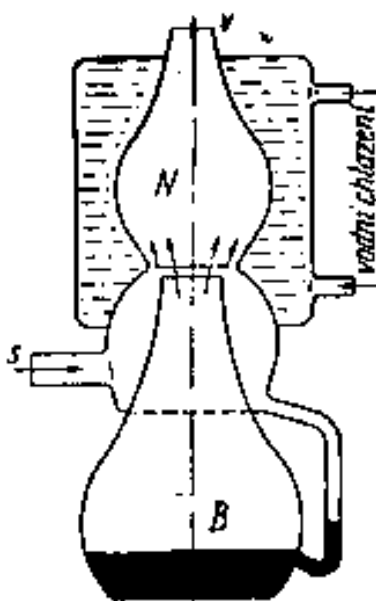
Páry na vodou ochlazených stěnách kondenzují a stékají do varníku.

Kromě oleje se užívá též rtuť (je ale třeba vyšších teplot a aby páry nevnikaly do čerpaného prostoru, musí být vymrazovány pomocí tekutého dusíku – Langmuirova rtuťová vývěva).

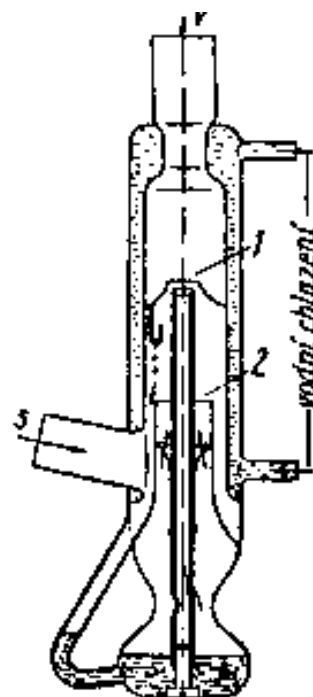
Mezní tlak pro olejové vývěvy:  $10^{-8}$  torr.

Pro Hg vývěvy a vývěvy s velmi kvalitními oleji:  $10^{-13}$  torr.

Obvykle jsou vícestupňové.



Obr.10.12. Langmuirova rtuťová difúzní vývěva (s – sání, v – připojení předčerpací vývěvy).



Obr.10.13. Dvoustupňová difúzní vývěva (s – sání, 1, resp.2 - první, resp. druhý stupeň).

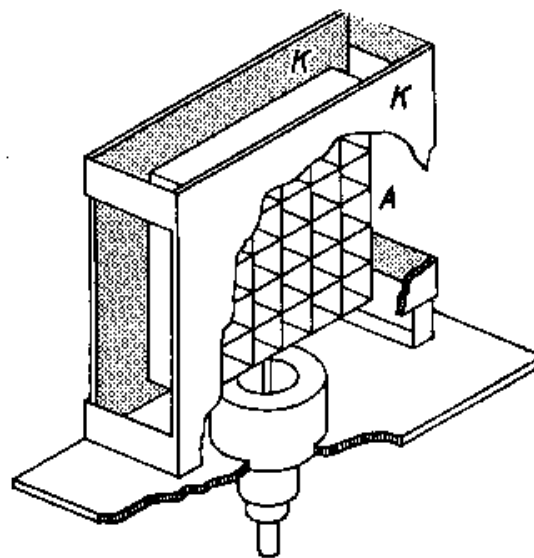
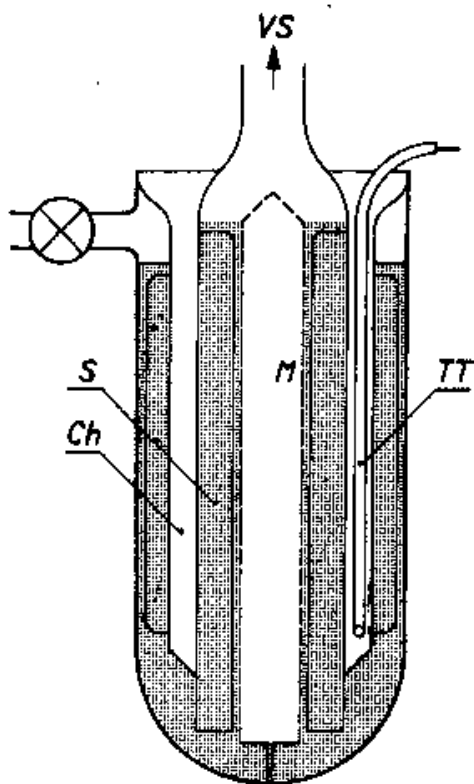
### 8.1.2. Vývěvy, založené na principu vazby molekul v systému.

Molekuly nejsou transportovány mimo vývěvu, ale jsou v ní vázány.

Proto se užívají jenom při velmi nízkých tlacích (mají omezenou vazbu molekul).

#### Kondenzační vývěvy.

Využívají kondenzace plynu na stěnách vývěvy, chlazené kapalným vodíkem, nebo heliem. Molekuly plynu dopadají na stěny, adsorbují se zde a nakonec vytvoří krystalický kondenzát



Obr.10.14. Molekulové síto ( Ch – tekutý  $N_2$ , M – mřížka, TT – topné tělísko, S – granule molekulového síta, VS – k vakuovému systému. Obr.10.15. Titanová rozprašovací vývěva. ( K – titanové katody, A – mřížková anoda).

### Iontově sorpční vývěvy

Využívají chemisorpce molekul na vrstvě aktivního kovu. Kov se buď vypařuje, nebo katodově rozprašuje.

Vypařovací vývěvy vyžadují značný elektrický příkon a musí být chlazeny vodou.

Vývěvy rozprašovací (např. titanová): skládá se ze dvou paralelních titanových deskových elektrod a mezi nimi je roštová anoda.

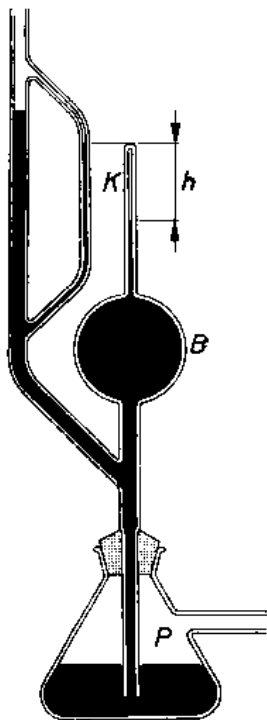
Magnetické pole je orientováno tak, aby bylo kolmé k rovině elektrod. Na anodu se vloží napětí několik kV, takže vznikne výboj, který rozprašuje materiál elektrod na okolní stěny. Na rozprášený materiál se váže zbytkový plyn (který je ionizovaný). Lze dosáhnout tlaku  $10^{-11}$  –  $10^{-12}$  torr.

Nevýhoda – je potřebný silný magnet.

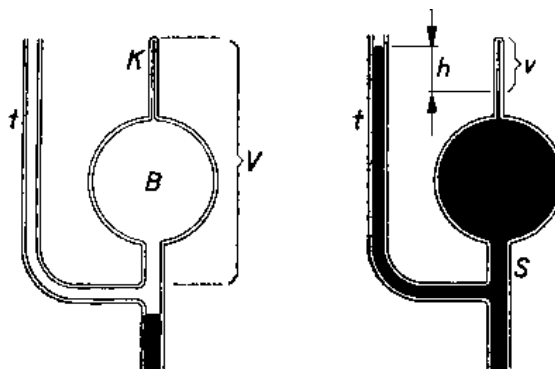
Getrování – využití při výrobě elektronek

## 10.2. Měření nízkých tlaků.

### 10.2.1. Rtuťové manometry (McLeodův)



Obr.10.16. Mac Leodův  
rtuťový manometr.



Obr.10.17. K objasnění principu činnosti Mac Leodova  
manometru.

Princip činnosti Mc Leodova manometru:

$$\delta p_x \cdot V = p \cdot v \quad (8)$$

$$p - p_x = h \cdot \rho \cdot g \quad (9)$$

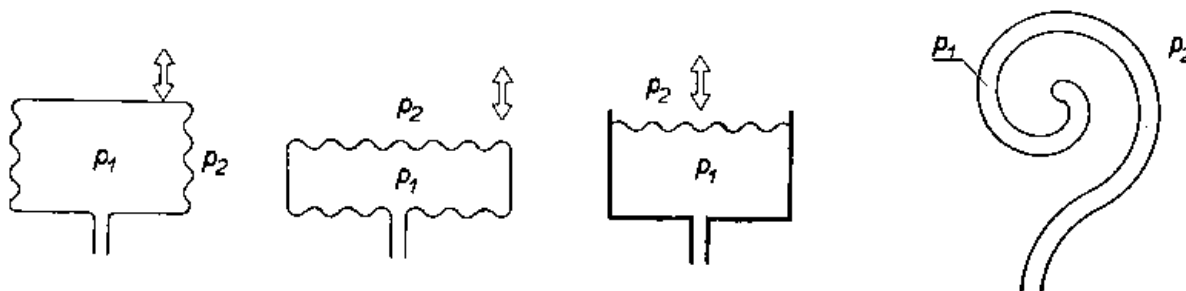
$$p_x = \frac{h \cdot \rho \cdot g \cdot v}{V - v} \quad (10)$$

Lze jimi měřit až  $10^{-10}$  torr.



### Membránové manometry

Tyto manometry využívají pružných vlastností membrán (které se prohnou v závislosti na rozdílu tlaku vně a uvnitř prostoru, který rozdělují).



Obr.10.18. Různé tvary nádob membránových manometrů (měch, krabice, pevná nádobka s membránou, nádobka spirálního tvaru).

Lze jimi měřit tlak asi do  $10^{-4}$  torr.

### Molekulární manometr (Knudsenův)

Tlak závisí na střední aritmetické rychlosti molekul a ta je funkcí teploty.

Princip: destička na křemenném vlákně se zrcátkem. Volná destička A je umístěna mezi dvěma elektrickým proudem vyhřívanými pevnými destičkami B tak, že se tepelný tlak na destičku A sčítá.

Rozsah měřeného tlaku:  $10^{-2} - 10^{-7}$  torr.

### Ionizační manometr

Skládá se ze žhavené katody – zdroje elektronů, které ionizují zbytkový plyn. Množství vzniklých iontů je úměrné hustotě plynu a tedy i jeho tlaku. Napětí anoda – katoda je 150 V – 200 V. Napětí kolektoru vůči katodě – 25V až – 50V.

Tlak plynu se určuje z proudu kolektorem.

Rozsah:  $10^{-3} - 10^{-8}$  torr. Po speciálních úpravách:  $10^{0-10-11}$  torr.

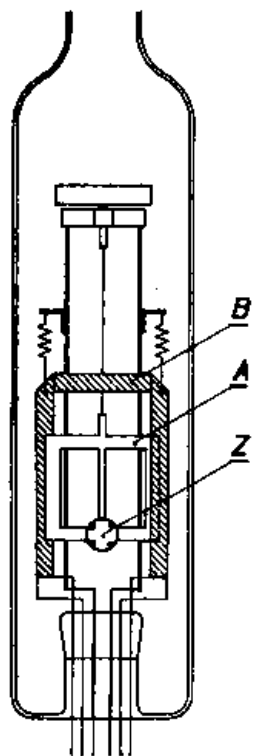
### Langmuirův – Dushmanův manometr

Využívá přenos impulzu zředěným plynem. Dolní kotouček rotuje a molekuly mezi oběma kotoučky přenášejí impulz na horní kotouček. Tlak se určuje z úhlu natočení zrcátka.

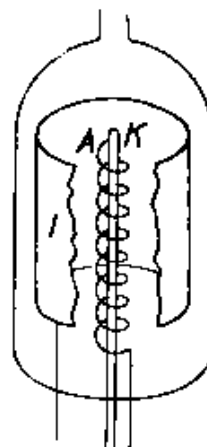
Měřicí rozsah:  $10^{-2} - 10^{-8}$  torr.

### Inverzní ionizační manometr.

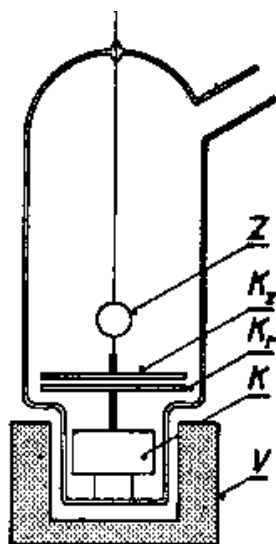
Princip: žhavená katoda, měří se proud iontů, dopadajících na kolektor. Proud iontů je však zkrasován proudem fotoelektronů, které se uvolňují z kolektoru vlivem měkkého rtg. záření, které se uvolňuje z mřížky, na kterou dopadají elektrony z katody. Při  $10^{-10}$  torr je kolektorový proud roven asi  $10^{-11}$  A.



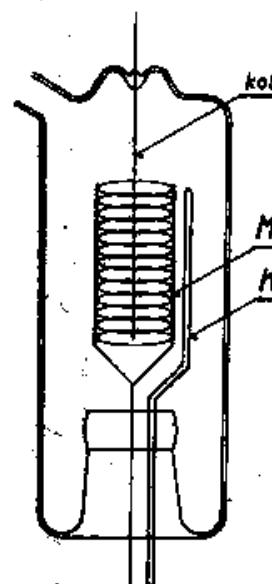
Obr.10.19. Molekulární manometr (A – destička se zrcátkem Z, B – vyhřívané destičky).



Obr.10.20. Ionizační vakuometr.

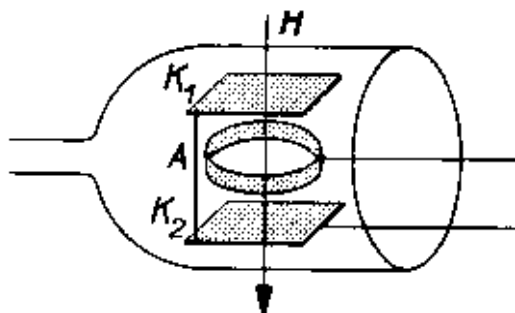


Obr.10.21. Langmuirův – Dushmanův manometr ( $K_z$  – zavěšený kotouč se zrcátkem Z,  $K_r$  – rotující kotouč, spojený s osou kotvy K, V – vinutí motoru).



Obr.10.22. Inverzní ionizační manometr se žhavou katodou. (M – mřížka, K – katoda, kol – kolektor iontů).

## Výbojový manometr s magnetickým polem (Peningův)



Obr.10.23. Penningův manometr.

Existuje několik různých typů takových manometrů.

Ionizační dráha se prodlužuje díky magnetickému poli.

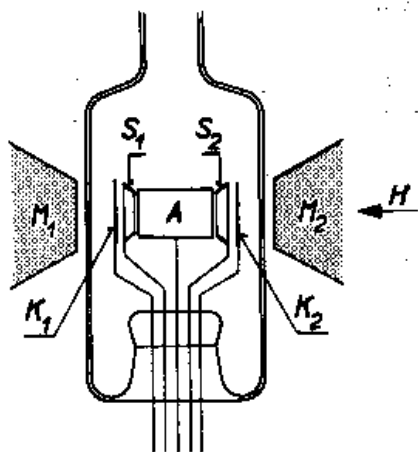
Jeho elektrody jsou studené, není problém s odplyněním. Mezi katodami je prstencová, nebo válcová anoda. Kolmo na osu anody působí magnetické pole, takže elektrony se pohybují po spirále od jedné katody k druhé a zpět, dokud srážky s atomy plynu nezpůsobí, že elektrony spadnou na anodu. Množství srážek a tím i doba průletu elektronu mezi katodou a anodou je dána tlakem plynu. Doba průletu elektronu určuje velikost proudu mezi katodou a anodou. Měření tohoto proudu určuje tedy tlak.

Napětí mezi K a A je několik kV, intenzita mag. pole až  $10^4$  A / m.

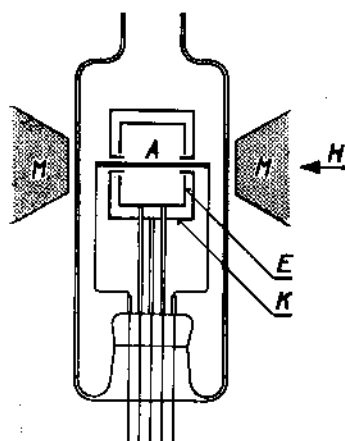
Měřicí obor  $10^{-2} - 10^{-6}$  torr.

## Inverzní výbojový manometr (Redheadův)

Osou válcové katody prochází tyčová anoda



Obr.10.24. Výbojový manometr se stíněním ( $M_1$ ,  $M_2$  – pólové nástavce magnetů,  $S_1$ ,  $S_2$  – stínící elektrody, A – anoda).



Obr.10.25. Inverzní výbojový manometr. (A – tyčová anoda, K – katoda, E – stínící elektroda).

Je třeba doplnit stínícími elektrodami (aby nevznikala autoemise elektronů z katod).

Lze měřit tlak až  $10^{-14}$  torr.

## 11. Keramika, kompozity, polymery.

### 11.1. Keramika.

Keramika spolu s dřevem, kostmi, kůží a kameny patřila mezi první materiály, které pravěký člověk zpracovával. Chceme – li definovat pojem keramika, můžeme říci, že je to *materiál převážně krystalický, složený především z anorganických sloučenin nekovového charakteru*. Litosféra obsahuje 50% kyslíku, 25% křemíku, 7% hliníku, 4% železa, 3% vápníku, 2% sodíku, 2% draslíku, 2% hořčíku, 1% vodíku a 0,6% titanu. Z toho je vidět, že nekovových prvků je v ní velké procento a surovinová základna pro výrobu keramiky je tedy velmi široká. Rovněž energetická náročnost výroby keramiky je nižší, než je energetická náročnost metalurgie (na výrobu 1 m<sup>3</sup> portlandského cementu se spotřebuje 30 GJ, zatímco na výrobu stejného objemu polystyrénu je to 180 GJ a nerezavějící oceli 870 GJ).

Keramika má některé velmi dobré a v praxi využitelné vlastnosti. Většina keramik jsou výbornými izolátory (ale na druhé straně vysokoteplotní supravodiče mají rovněž strukturu keramik). Mají poměrně malou hustotu (cihly ~ 2.10<sup>3</sup> kg.m<sup>-3</sup>, beton ~ 3.10<sup>3</sup> kg.m<sup>-3</sup>, ale hliník ~ 2,5.10<sup>3</sup> kg.m<sup>-3</sup> a ocel ~ 7,8 .10<sup>3</sup> kg.m<sup>-3</sup>) a patří k vůbec nejtvrdějším látkám. Proto jsou velmi dobrým konstrukčním materiálem ve stavebnictví a ve strojírenství. Většinu z nich však chybí kujnost.

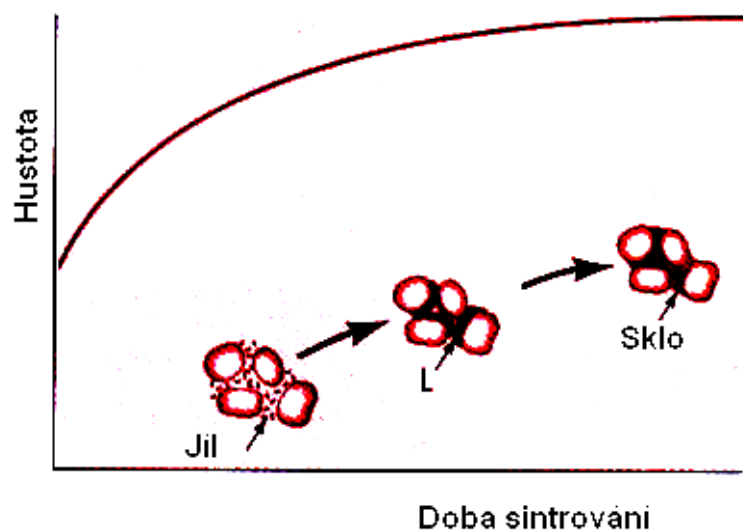
Jako zajímavost je možno uvést skutečnost, že cement byl vyráběn již v starověku (bylo z něho postaveno např. Římské Koloseum). Technologie však byla zapomenuta a objevena znovu až v novověku (v roce 1824).

Struktura keramických materiálů je heterogenní, polykrystalická a polyfázová. Keramika obsahují zpravidla více krystalických fází a často i fáze skelné, vzniklé roztavením některých anorganických látek (křemičitanů). Z makroskopického hlediska se ale keramické materiály jeví jako homogenní a izotropní. Je to dáno tím, že jednotlivá zrna (fáze a složky) jsou uspořádána náhodně. Teprve když dojdeme až do těchto zrn, naruší se homogenita a izotropie. Velkou důležitostí hrají u keramik i póry, které se v nich uplatňují jako zvláštní fáze se specifickými vlastnostmi (nulová hmotnost a tuhost, tepelná vodivost, apod.).

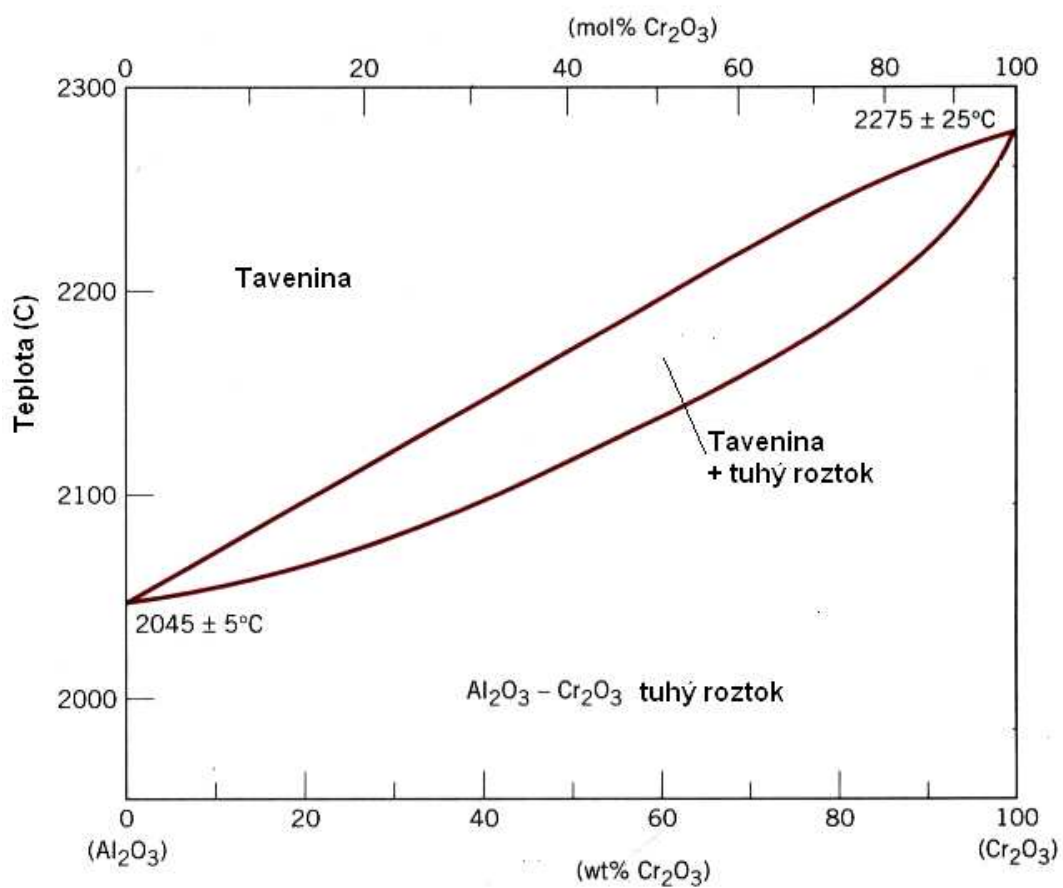
Z předcházejícího výkladu plyne, že existuje velké množství různých druhů keramik a to tradičních (cihly, porcelán, cement), až po speciální keramika, vyvíjená v posledních desetiletích (vysokoteplotní supravodiče, materiály pro leteckou, kosmickou, automobilní a vojenskou techniku). Uvedme nejdříve nejzajímavější charakteristiky tradičních i moderních keramik.

Na Obr.11.1. je znázorněna závislost hustoty keramik na době sinterování (spékání), což je jeden ze způsobů úpravy keramik.

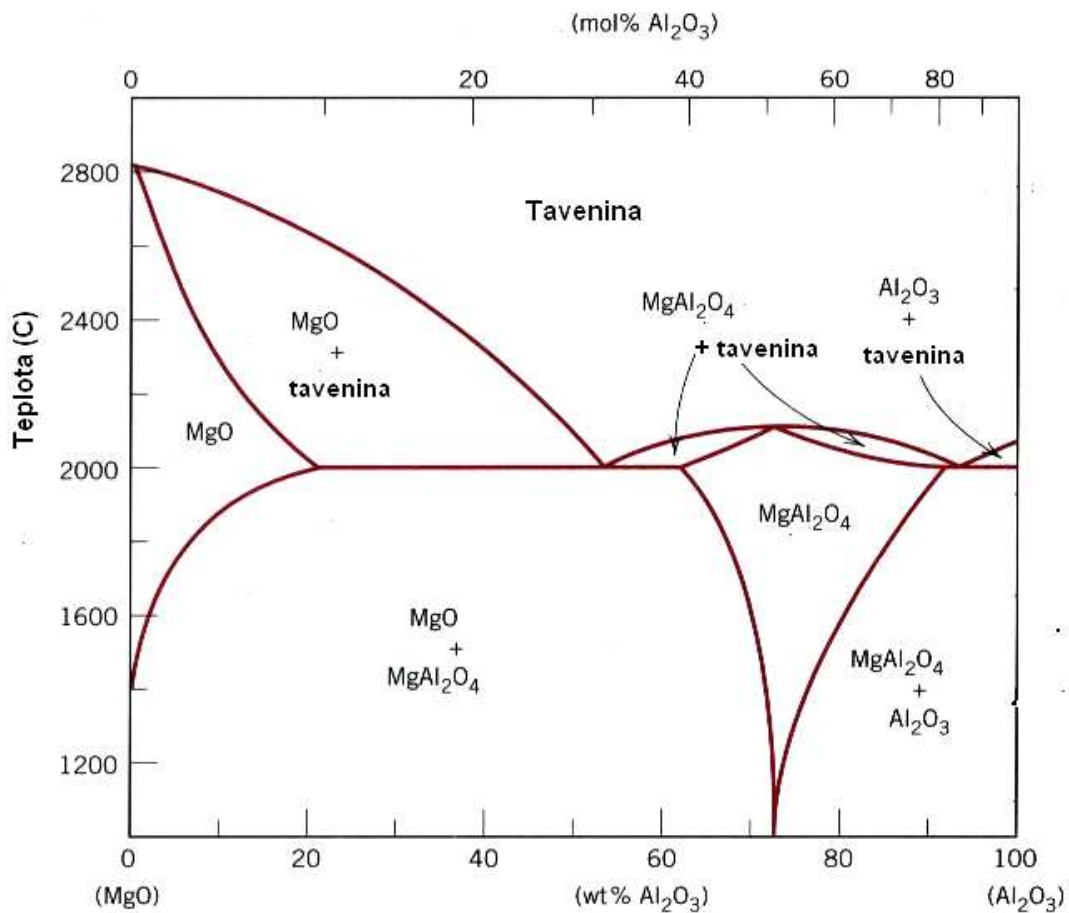
Na Obr. 11.2. je uveden fázový diagram moderního keramik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kromě dokonalé rozpustnosti obou složek stojí za povšimnutí vysoký bod tání této slitiny. Omezenou rozpustnost obou složek vykazuje keramika MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, vyznačující se rovněž vysokým bodem tání (Obr.11.3). Jako třetí fázový diagram je uvedena na Obr 11.4 struktura keramik SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, jejíž složky jsou vzájemně nerozpustné a tvoří dvě významné struktury kristobalit a mullit.



Obr.11.1. Závislost hustoty keramika na době sintrovaní



Obr.11.2. Rovnovážný diagram keramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Obr.11.3. Rovnovážný diagram keramika MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Na závěr shrňme základní poznatky o perspektivních keramikách, jejich možnostech, vlastnostech a užití (předpokládáme, že vše základní o využití tradičních keramik je čtenáři alespoň částečně známo z praktického života).

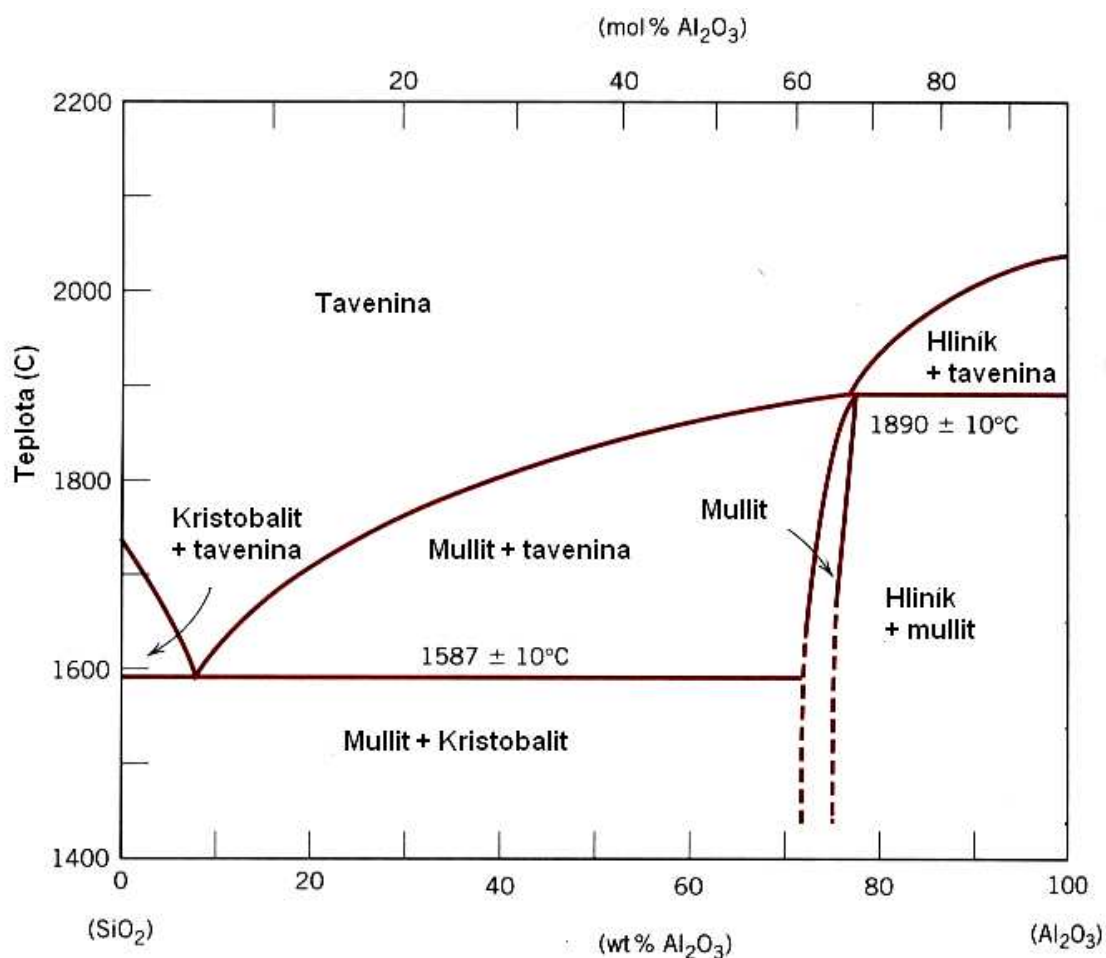
Z předcházejících obrázků plyne, že keramika mají většinou vysoký bod tání a poměrně nízkou hustotu. Proto jsou předurčena pro využití v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Vyšší pracovní teplota spalovacího motoru totiž zvyšuje jeho účinnost a nižší hmotnost motoru ještě dále tento trend podporuje. Takové moderní motory, založené na bázi keramik Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a ZrO<sub>2</sub> mají navíc další výhodu – jsou otěruvzdorné.

Hlavní nevýhoda keramik – jejich křehkost může být eliminována několika způsoby:

- a) Nanášením křehkých keramik na vhodný kov (tažnější). V takovém případě bývá problémem zajištění dobré přilnavosti mezi keramikem a kovem.
- b) Malá plasticita keramik je důsledkem malého počtu skluzových systémů, ve kterých se mohou dislokace pohybovat. Zvýšení počtu těchto systémů bude pravděpodobně možné uskutečnit pomocí vhodných příměsí a pomocí vhodného technologického zpracování keramika.



- c) Některá keramika jsou využívána i za účelem ochrany osob, nebo jiných objektů před působením střel (např. neprůstřelné vesty). Jejich podstatou je kompozit, složený z keramických destiček, kombinovaných s tažnějším a měkčím podkladem (speciální plastová matrice). Jako materiál pro tato keramika se v tomto případě používá nejčastěji  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{SiC}$  a  $\text{TiB}_2$ .



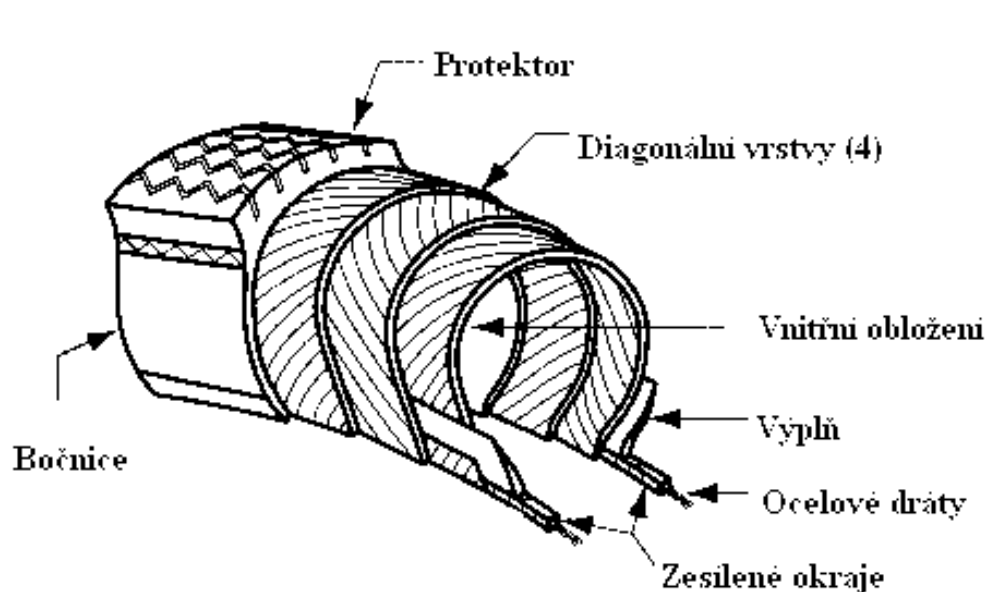
Obr.11.4. Rovnovážný diagram keramika  $\text{SiO}_2$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## 11.2. Kompozity.

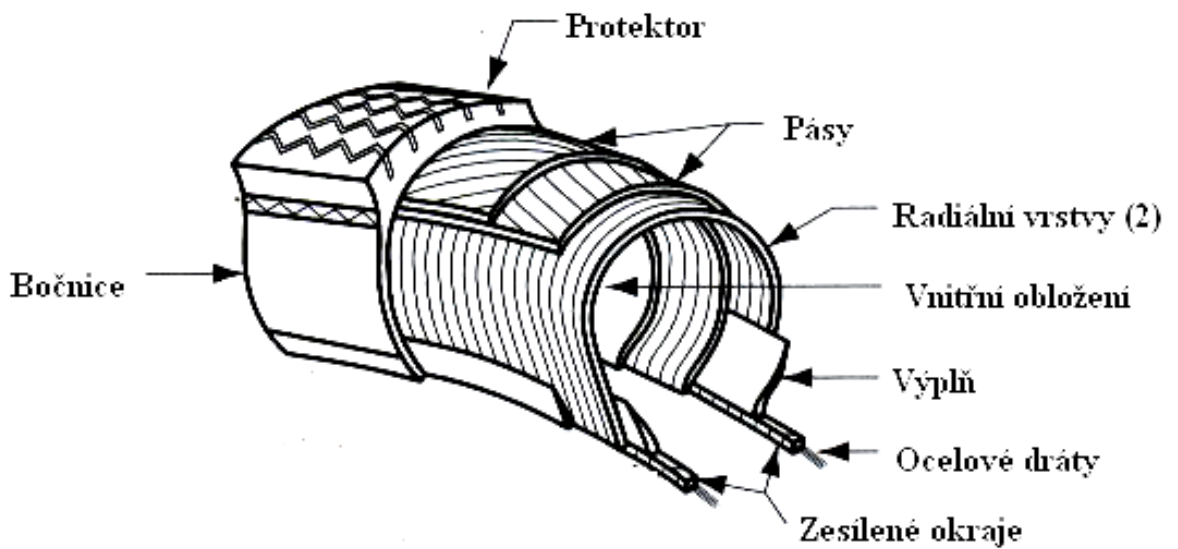
Již podle názvu lze kompozity definovat jako vícesložkové, nebo vícefázové materiály, přičemž důležitou roli u nich nehrají pouze složky či fáze, ale i rozhraní mezi nimi. Jinými slovy, *kompozity jsou složené heterogenní systémy, tvořené minimálně dvěma složkami či fázemi, které se od sebe liší svými fyzikálními vlastnostmi.*

Přestože nauka o kompozitech je chápána jako moderní vědní odvětví nauky o materiálu, jsou kompozity využívány lidstvem od nepaměti a to zejména pro jejich výborné mechanické vlastnosti.

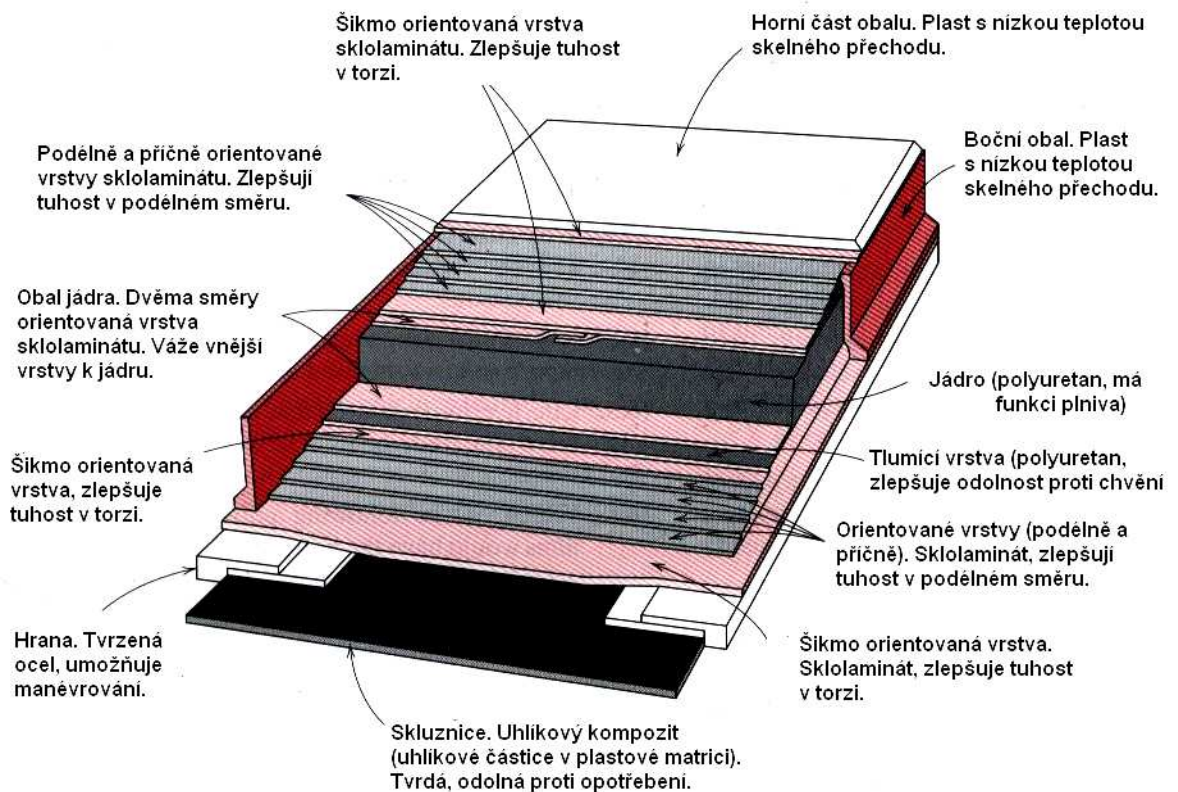
Typickými, již dávno známými kompozity jsou dřevo a stébla (tvořená pružnými vlákny celulózy a tvrdým ligninem), kosti (pružná bílkovinná tkáň a tvrdé soli vápníku a fosforu). Pravěký člověk vyráběl velmi kvalitní kompozitní luky (z dřeva a rohoviny) a rovněž damascénská ocel a ocel, z níž byly zhotovovány meče samurajů, patří rovněž mezi kompozity. Běžným kompozitním materiálem současnosti je železobeton (tvrdý, ale křehký beton + měkkí, ale pružné ocelové pruty), nebo sklolaminát (epoxidové pryskyřice nebo termoplasty, zpevněné skleněnými vlákny), či materiál pro výrobu „neviditelných“ letadel (polymer + uhlíková vlákna). I tak známé výrobky, jako jsou pneumatiky (Obr.11.5. a Obr.11.6), nebo moderní laminátové lyže (Obr.11.7) jsou typickými vícesložkovými kompozity.



Obr.11.5. Schéma složení diagonální pneumatiky



Obr.11.6. Schéma složení radiální pneumatiky



Obr.11.7. Schéma složení moderních laminátových lyží.

Co se týká vnitřní struktury, dělíme kompozity na *kompozity s částicovými plnivými*, *kompozity s vyztužujícími vlákny* a *lamelární kompozity*.

### 11.2.1. Kompozity s částicovými plnivými (disperzně zpevněné kompozity).

Částice, používané jako plniva kompozitů, mají tvar kulovitý, destičkovitý, jehlicovitý, nebo nepravidelný. Jejich složení je též rozmanité: vápenec, oxid křemičitý, oxidy křemíku, hořčíku a hliníku, skleněné mikrokuličky, slída, nebo mikročástice kovů. Částicová plniva mění značně takové mechanické vlastnosti matrice, jako je modul pružnosti, houževnatost, tvrdost, apod.

Na Obr.11.8. je zobrazen částicemi SiC zpevněný hliník (i se schématem výroby). V Tab.11.1. je dále uveden stručný přehled disperzně zpevněných kompozitů i s oblastí jejich využívání.

Tab.11.1.

Kompozit	Oblast využití
Ag - CdO	Materiály pro elektrické kontakty
Al – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Využití v jaderné technice
Be - BeO	Kosmická a jaderná technika
Co – RhO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Materiály, odolné proti creepu
Ni – 20% Cr – ThO <sub>2</sub>	Komponenty turbín
Pt – ThO <sub>2</sub>	Vlákna, elektrosoučástky
W – ThO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	Vlákna, topná tělesa

Na Obr.11.9 je dále uveden princip výroby Ag – W elektricky vodivého kompozitu (wolframový prášek je stlačen (a), (b), poté sintrován (spečen) (c) a do vzniklých pórů vnikne ve vakuu roztavené stříbro). Vzniklý materiál je velmi dobře vodivý a navíc oteruvzdorný.

Na Obr.11.10 je ukázán vliv disperzně rozptýlených částic kaolínu na zpevnění a modul pružnosti polyetylénu.

Na Obr.11.11 je uvedena mikrofotografie betonu a na Obr 11.12. fotografie kulovými částicemi uhlíku plněné pryže (pneumatika). Zvětšení 80 000x. Oválné, vodní kapičky připomínající útvary, jsou malé bublinky vzduchu v pryži, tmavé objekty jsou částice uhlíku.

### 11.2.2. Kompozity, vyztužené vlákny.

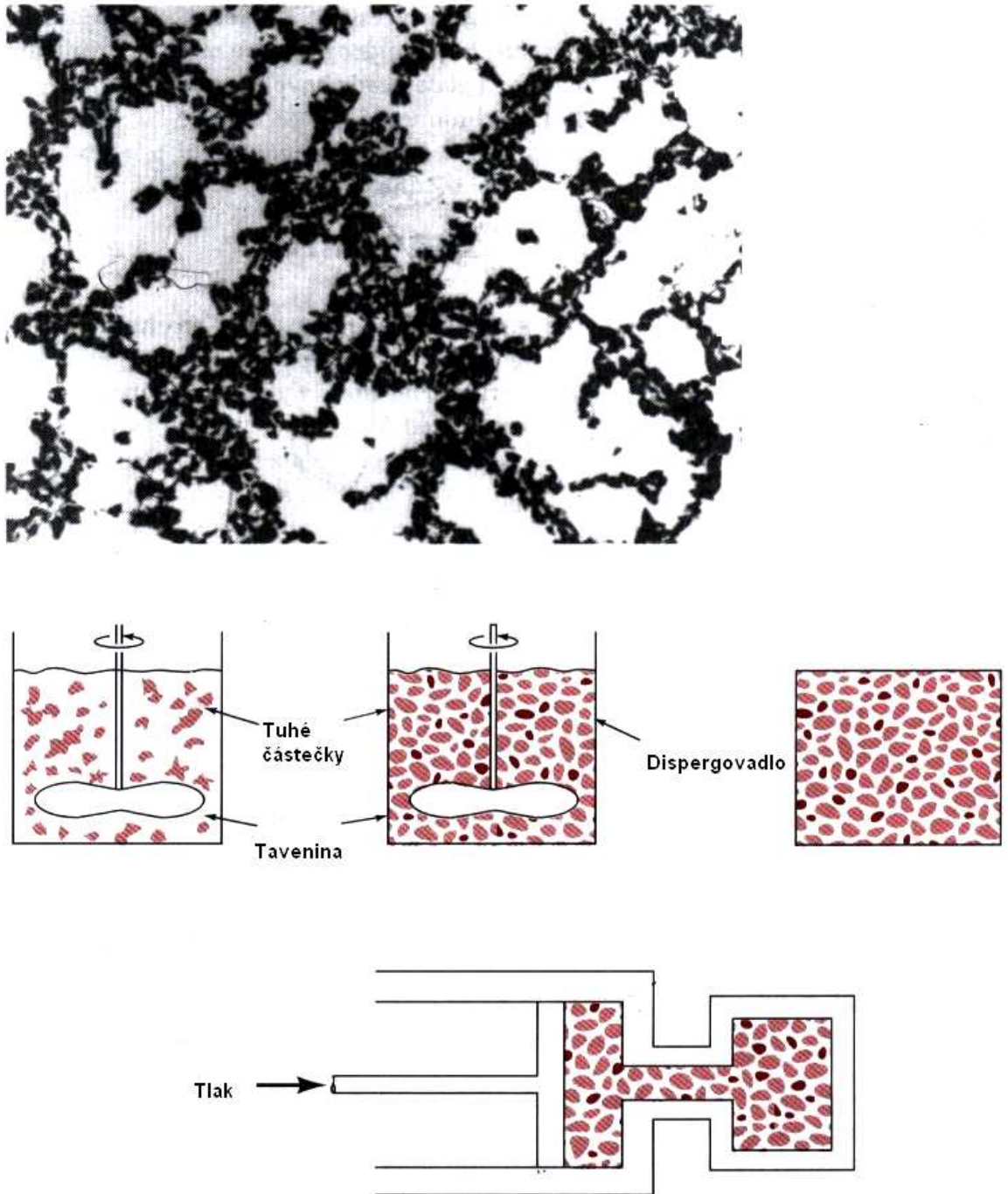
Významnou kvantitativní charakteristikou vláken, používaných jako plniva u kompozitů, zpevněných vlákny, je poměr  $E_V / \rho_V$  (modul pružnosti, dělený hustotou) a poměr  $R_{mV} / \rho_V$  (pevnost v tahu, dělená hustotou), neboť právě tyto veličiny rozhodují o hmotnosti celé konstrukce. Nejčastěji používanými materiály pro taková vlákna je sklo, uhlík, bór s wolframem, ocel, kevlar (druh polymeru), apod. Na Obr 11.13 jsou schematicky uvedeny dvě možnosti vytváření kompozitů, zpevněných vlákny a na Obr 11.14 je ukázán vliv orientace vláken (vzhledem ke směru působící síly) na zpevnění sklolaminátu.

Na Obr.11.15 je to vše doplněno mikrofotografií lomu slitiny AgCu, zpevněné uhlíkovými vlákny (zvětšeno 3000x )

Schéma trojrozměrného vláknového kompozitu je uvedeno na Obr.11.16.

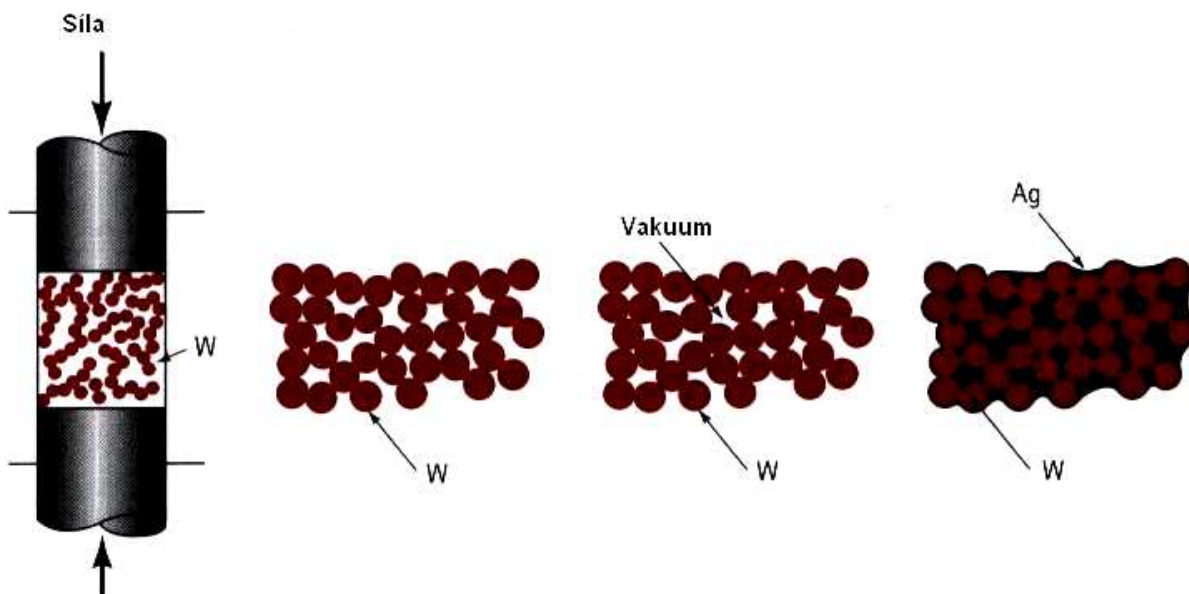
Obr.11.17. ukazuje schematicky vliv vláken na mechanické vlastnosti matrice (v souřadnicích  $\sigma - \epsilon$ ).

Přehled způsobů výroby kompozitů, zpevněných vlákny podávají názorně Obr 11 18 – 11.22.)

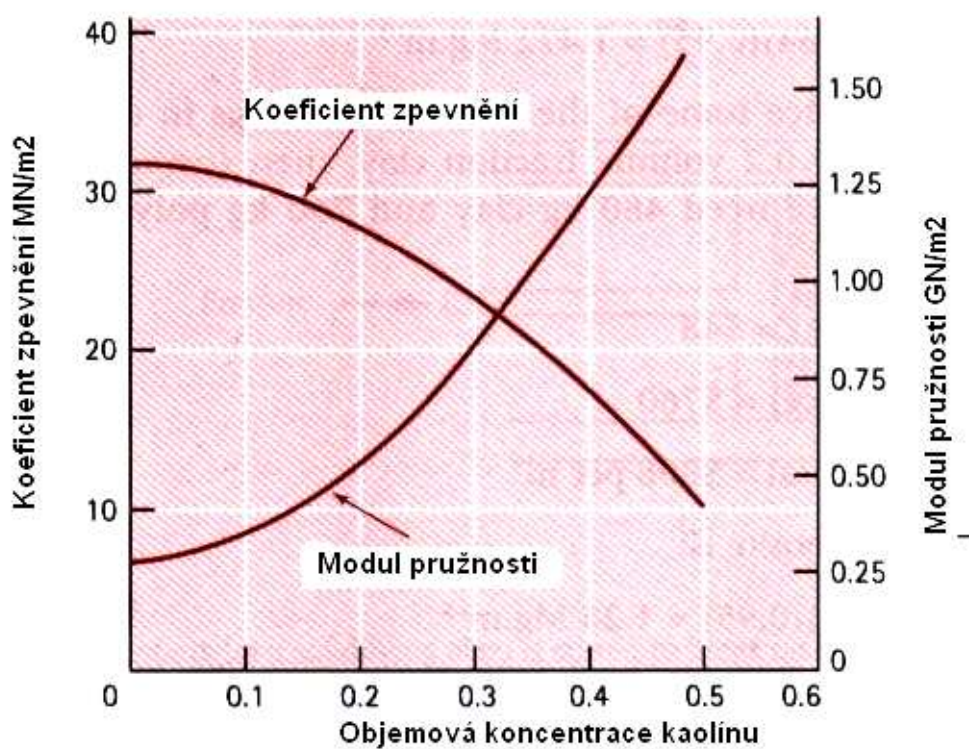


Obr.11.8. Částicemi SiC zpevněný hliník (i se schématem výroby). Z obrázku je vidět, že dochází k segregaci částic SiC (tmavé).



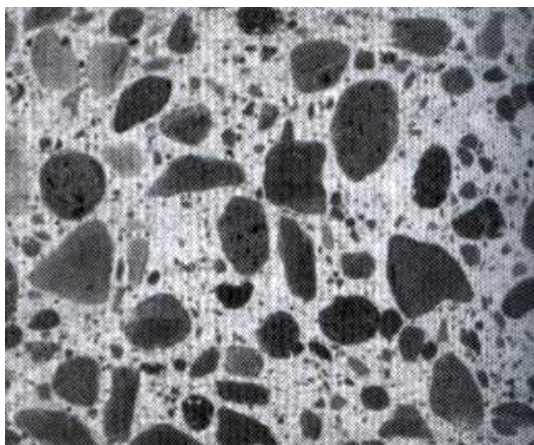


Obr.11.9. Schéma výroby elektricky vodivého kompozitu AgW

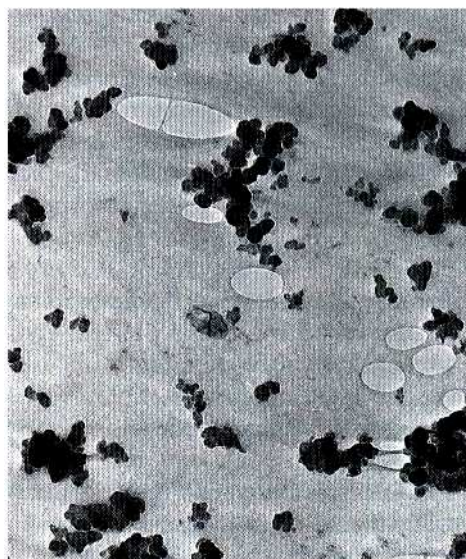


Obr.11.10. Vliv obsahu kaolínu na mechanické vlastnosti polyetylénu.

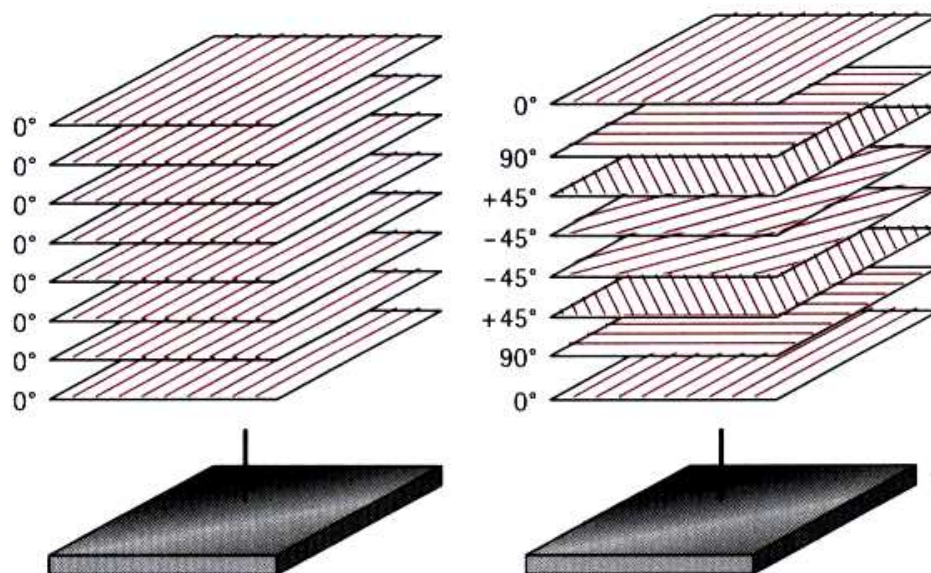




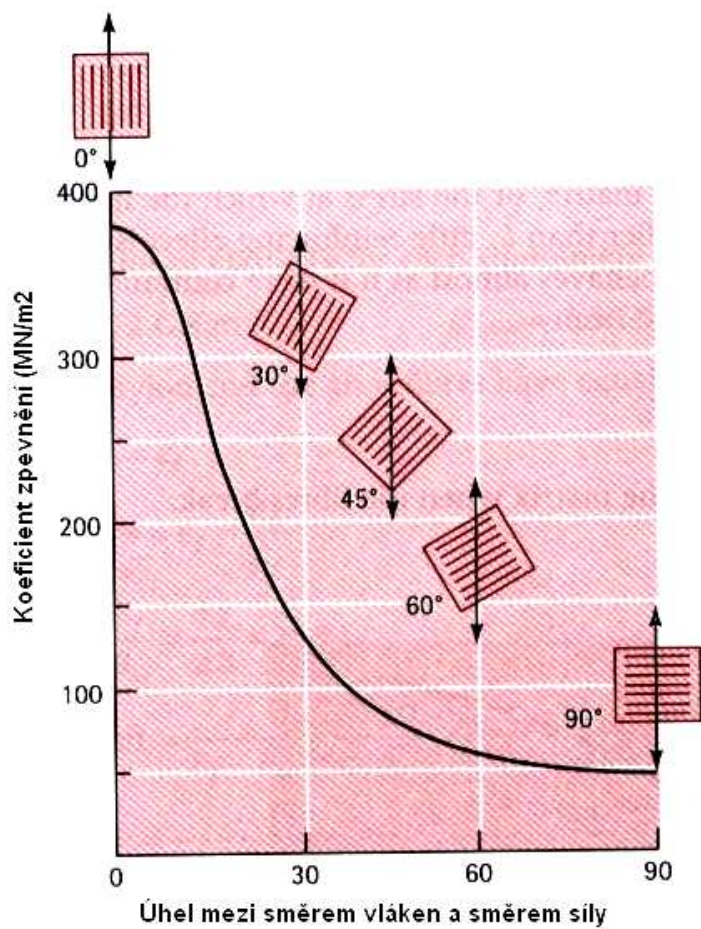
Obr.11.11. Beton



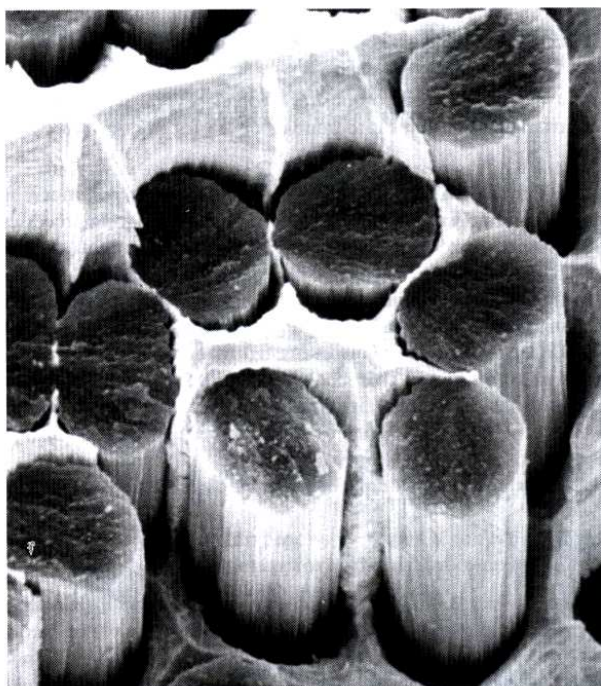
Obr.11.12. Kaučuk (pneumatika)



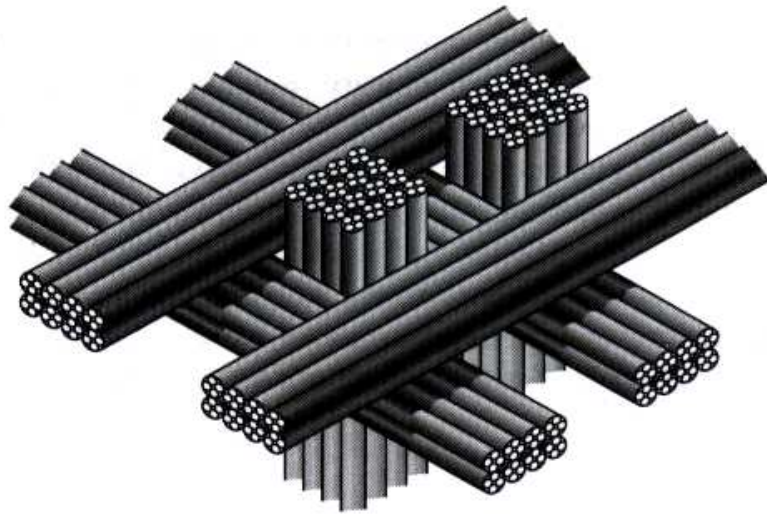
Obr.11.13. K možnostem vytváření kompozitů, zpevněných vlákny.



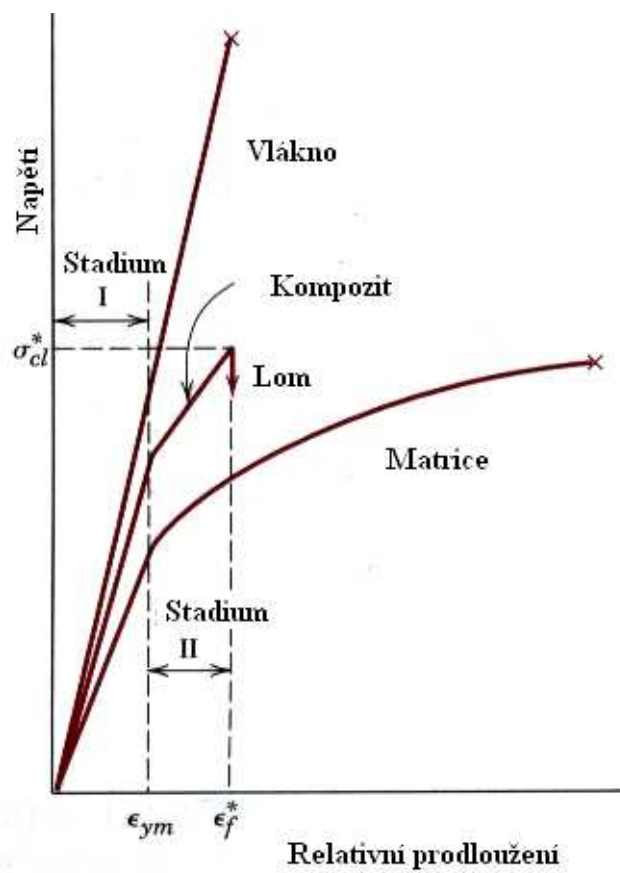
Obr.11.14 Vliv orientace vláken na zpevnění epoxidového kompozitu



Obr.11.15. Slitina AgCu, zpevněná uhlíkovými vlákny.

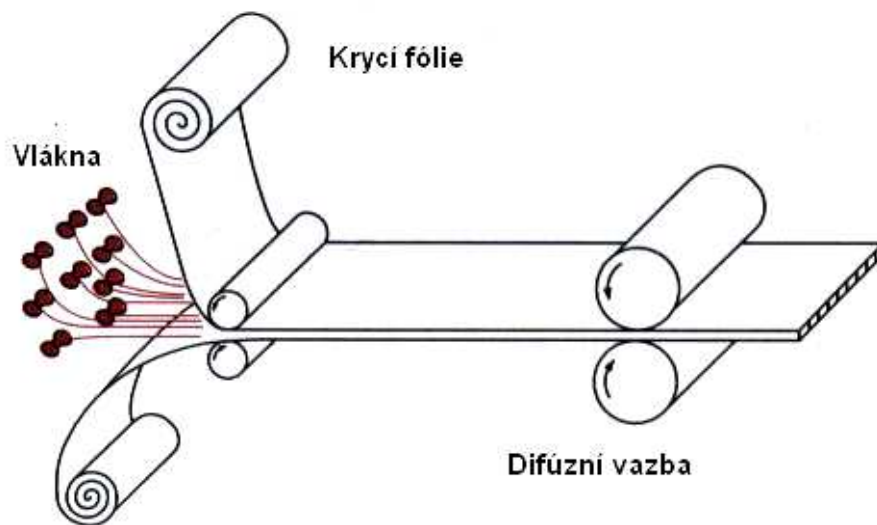


Obr.11.16. Trojrozměrný vláknový kompozit.

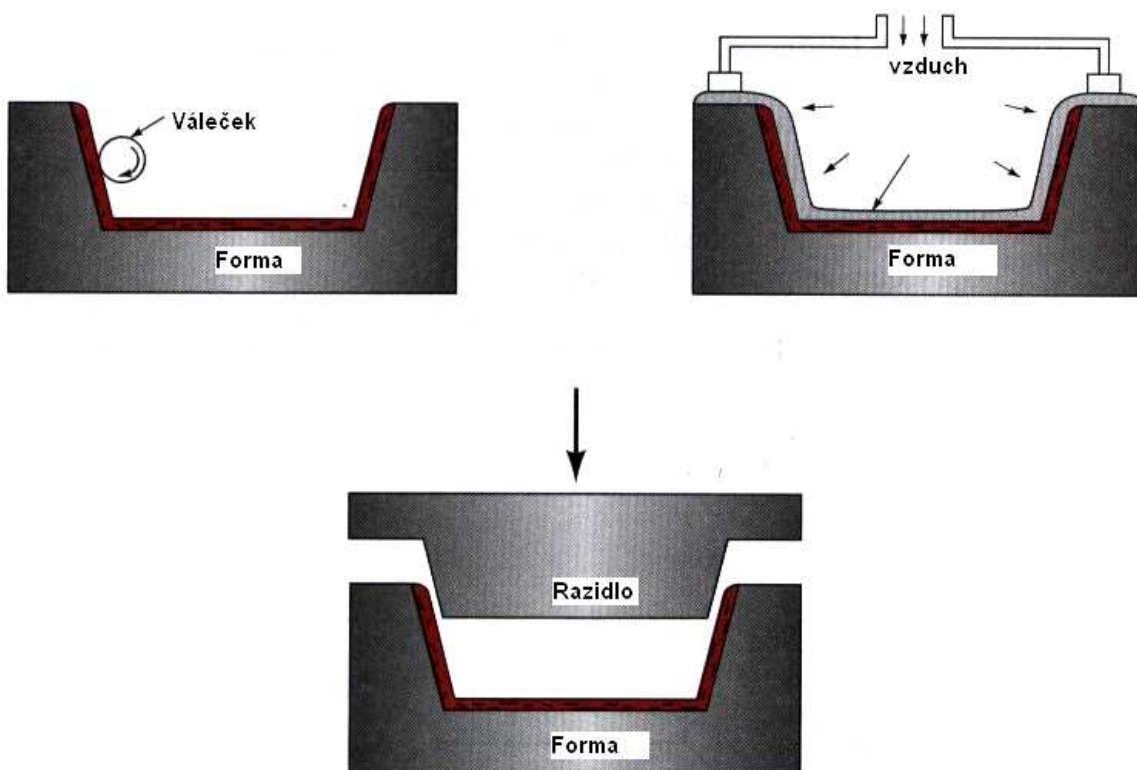


Obr.11.17. Vliv vláken na mechanické vlastnosti kompozitu (křehké vlákno a tažná matrice)

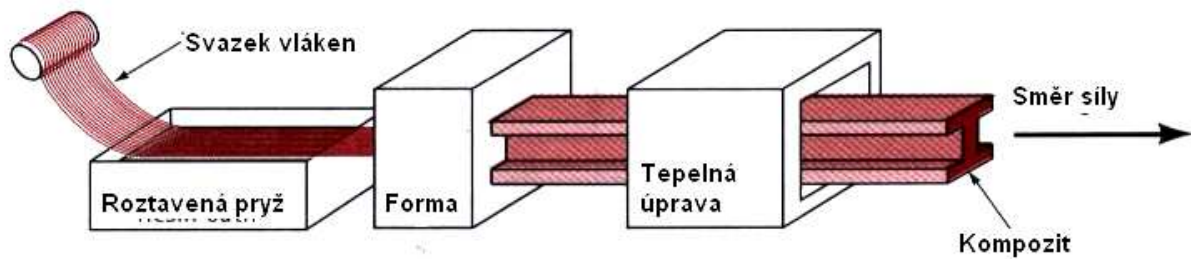




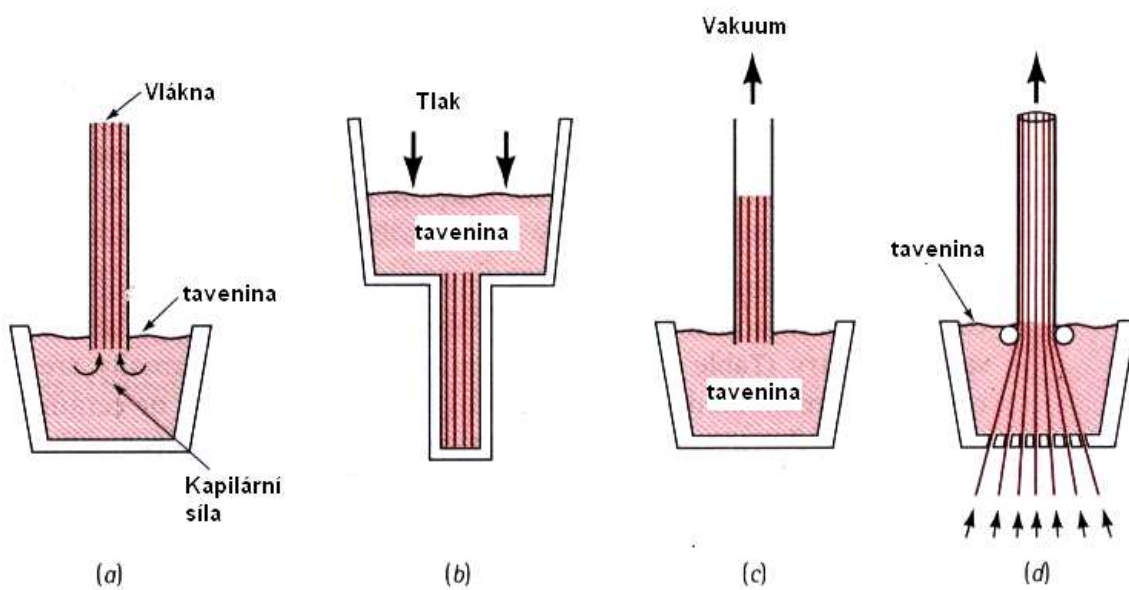
Obr.11.18. Výroba vláknny zpevněných fólií či desek.



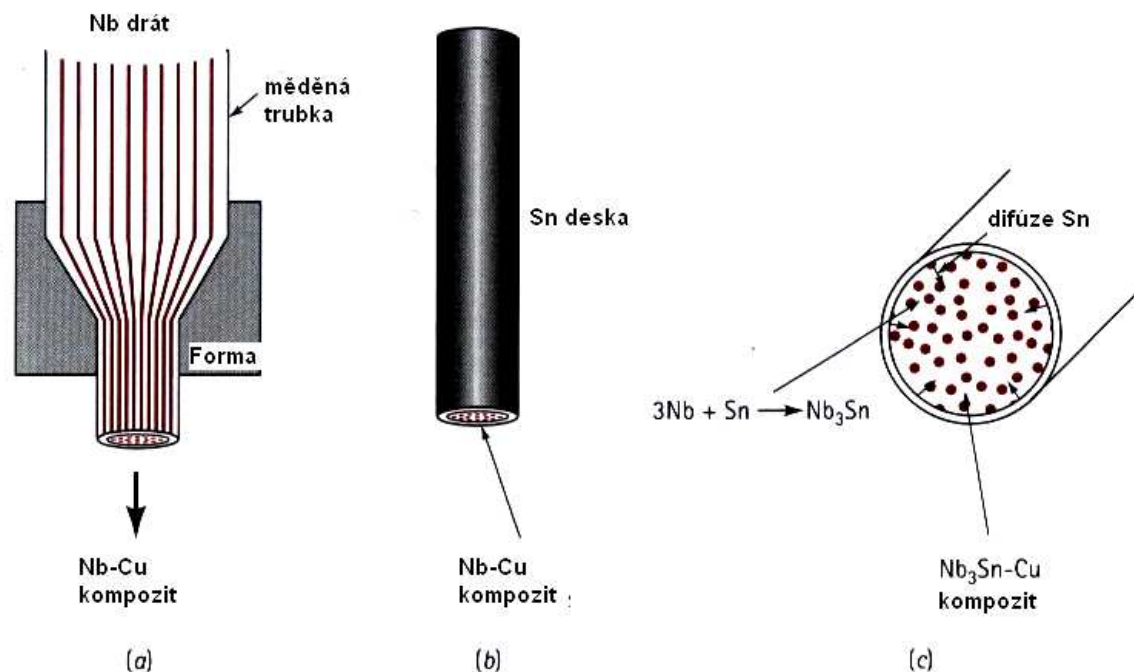
Obr.11.19. Různé postupy při lisování vláknny zpevněných kompozitů.



Obr.11.20. Schéma výroby kompozitů tažením.



Obr.11.21. Výroba vláknových kompozitů odléváním: a) kapilárním vzestupem, b) tlakové lití, c) vakuové tažení, d) kontinuální lití.



Obr.11.22. Výroba kompozitních nízkoteplotních supravodičů.

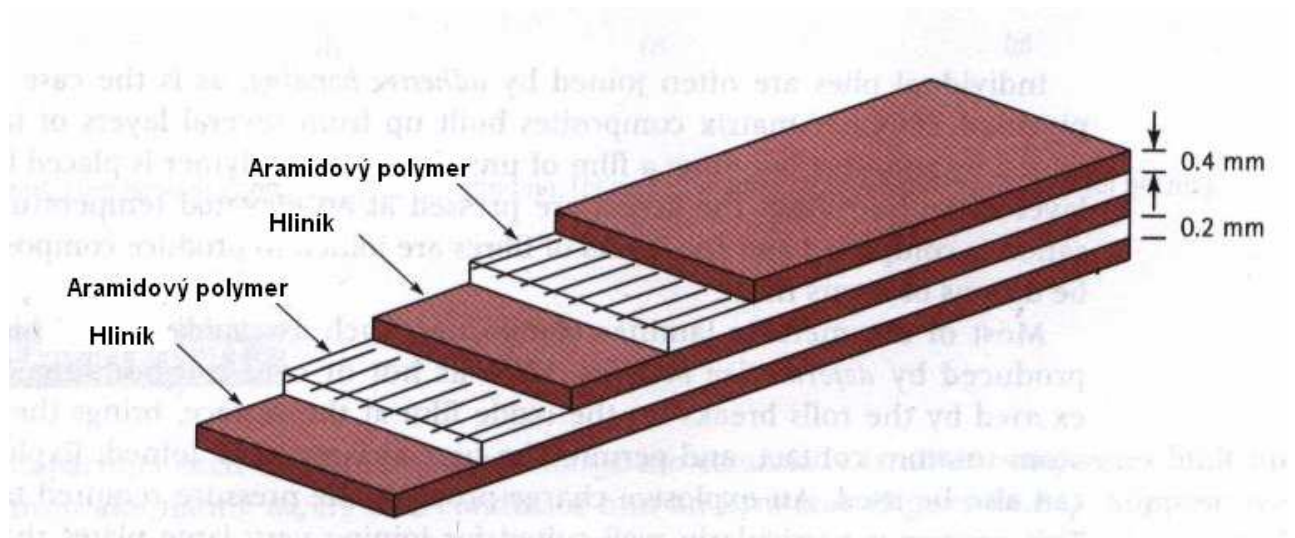
### 11.2.3. Laminární kompozity.

Laminární kompozity jsou tvořeny střídajícími se vrstvami (nebo vrstvičkami) složek o různých vlastnostech. Radíme sem např. kombinace velmi tenkých povlakových vrstev, tlustší ochranné antikoroziční vrstvy, ale i tak známé laminární kompozity, jakými je dřevěná překližka (Obr.11.23), nebo moderní laminátové lyže (Obr.11.7). Na Obr.11.24 je pro doplnění znázorněna struktura aramid – hliníkového laminátu Arall, používaného zejména v letecké a kosmické technice pro jeho pevnost, nízkou hustotu, odolnost proti únavě a výborné antikoroziční vlastnosti. Na Obr.11.25. je uvedeno schéma výroby laminárních kompozitů a na Obr.11.26 způsob výroby sendvičových kompozitů.

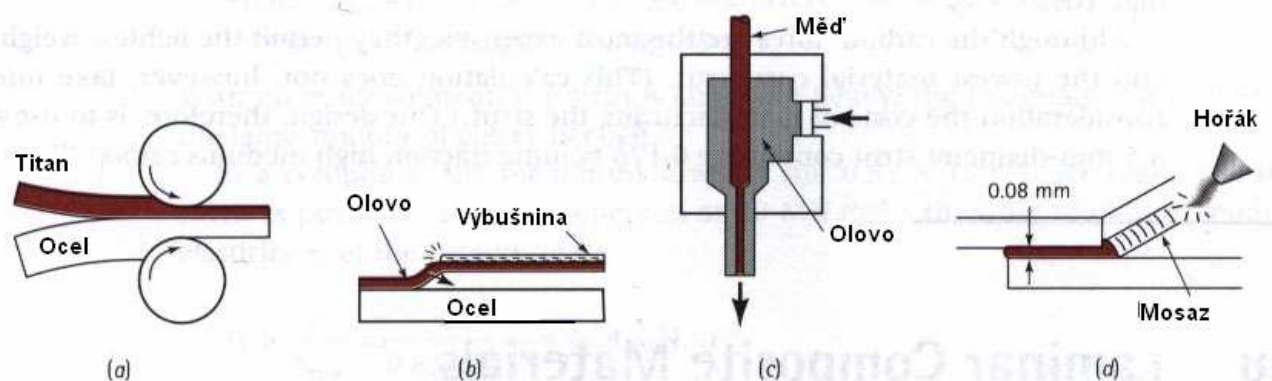


Obr.11.23. Jeden z nejznámějších laminárních kompozitů – dřevěná překližka.



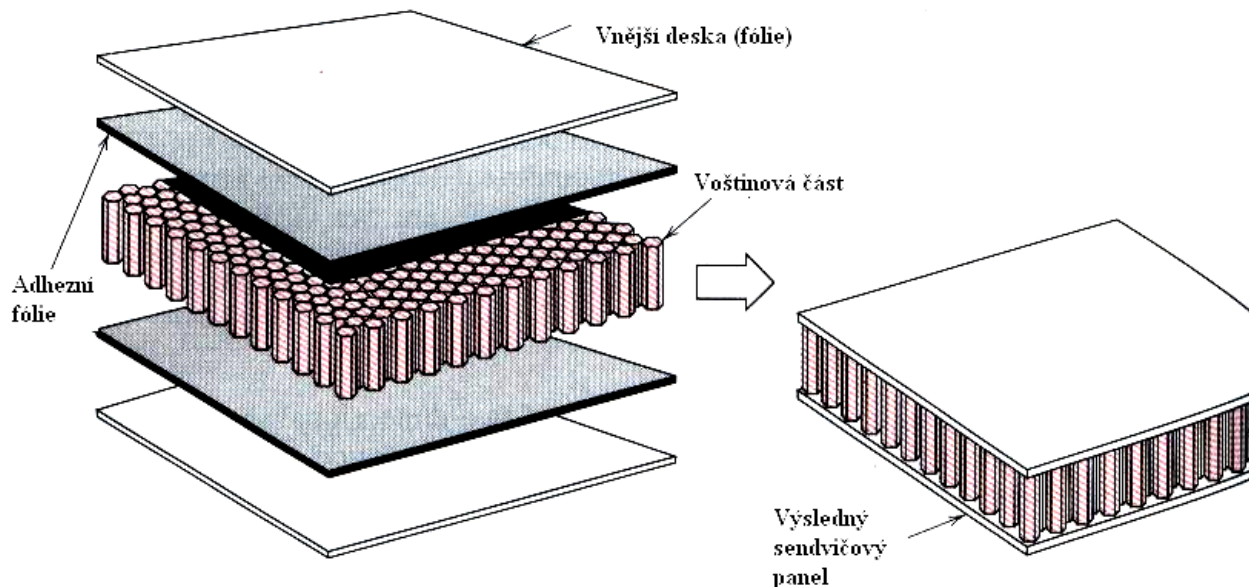


Obr.11.24. Struktura aramid – hliníkového kompozitu



Obr.11.25. Různé způsoby výroby laminárních kompozitů

Závěrem tohoto odstavce lze říci, že moderní kompozity pronikají stále více do běžného života. Setkáme se s nimi ve zdravotnictví (bílé zubní plomby, náhrady kostí, atd.), v automobilovém průmyslu (interiér, nárazníky, ale i části motorů) ve stavebnictví, letecké a kosmické technice, při výrobě lodí, atd. Proto jsou kompozity dalším kandidátem (stejně jako keramika), po němž by mohla být nazvána doba, která nahradí dobu železnou.



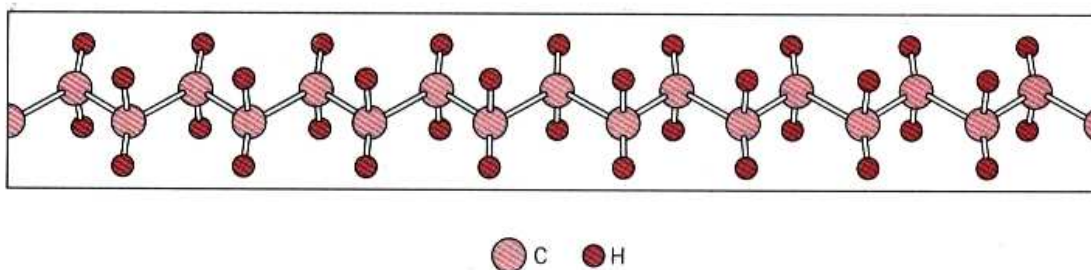
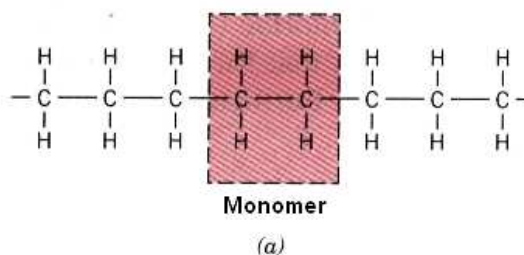
Obr.11.26. Výroba sendvičových kompozitů.

## 11.3. Polymery.

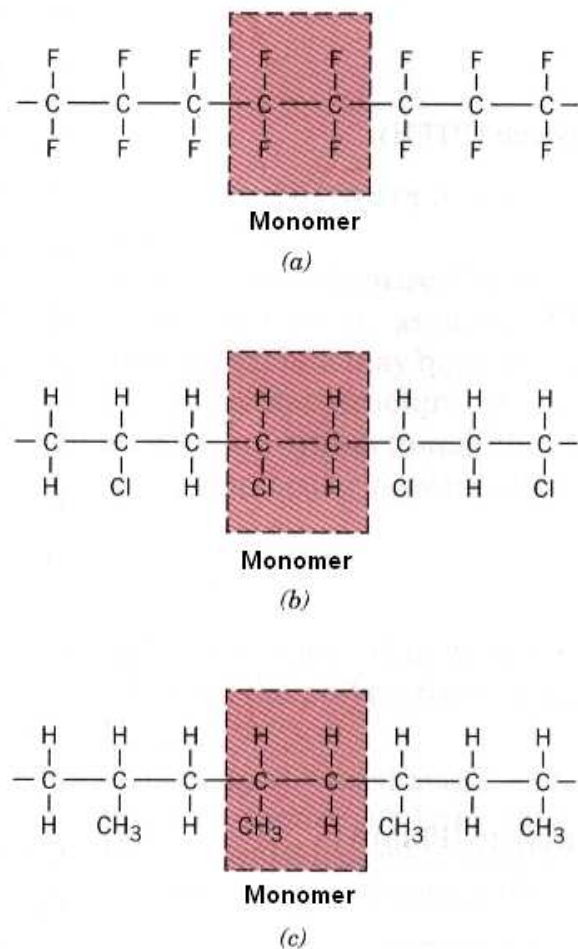
### 11.3.1. Úvod, rozdělení polymerů.

Přestože jsou makromolekuly jedním z nejrozšířenějších druhů organických látek v přírodě, větší pozornost jim byla věnována až po první světové válce. Poté, jak byly zjištěny jejich výborné vlastnosti i možnost praktického využití, šel jejich vědecký a technický vývoj velmi rychle kupředu.

Molekuly polymerů, jak plyne z jejich názvu, se skládají z velkého množství základních stavebních kamenů, zvaných *monomery*. Příklad polymerů, tvořených z různých monomerů, je uveden na Obr.11.27. a 11.28.



Obr.11.27. Polyetylen



Obr.11.28. Struktura a) polytetrafluoroethylenu, b) polyvinylchloridu a c) polypropylenu.

Polymery můžeme dělit podle různých hledisek, z nichž první je rozdělení na termoplasty a duroplasty.

*Termoplasty* (např. polyetylén) mají dlouhé molekuly, jejichž délka s rostoucí teplotou klesá, polymer degraduje a ztrácí své původní dobré vlastnosti.

*Duroplasty* (např. bakelit) mají síťovitou strukturu, která je činí pevnými. Při vyšších teplotách se rozpadávají (oxidují).

Polymery jsou často kombinovány s různými plnivy, které mají zpravidla zlepšit zejména jejich mechanické vlastnosti, jako je modul pružnosti, mez pevnosti, ořezuvzdornost apod. Jako plniva používáme částice (saze, křemičitany, křída i částice kovů aj.), nebo vlákna (např. papír, textilie). Polymery lze dále barvit, parfémovat a vytvářet z nich kompozity.

Jiné dělení kompozitů vychází ze způsobu jejich vzniku:

*Polymery přírodní* (bílkoviny, škrob, celulóza, kaučuk a látky syntetické, ale přírodním polymerům podobné (celuloid, vulkánfibr, viskóza, umělé hedvábí, umělá rohovina apod.).

*Polymery syntetické* (polyetylén, polyvinylchlorid, atd. – viz přehled polymerů a jejich vlastností např. v knize, doporučené v tomto odstavci).

Dále můžeme dělit polymery podle způsobu jejich použití a to na *vlákna, fólie, desky, trubky, laky, elastomery (kaučuky), lepidla, maziva*, apod.

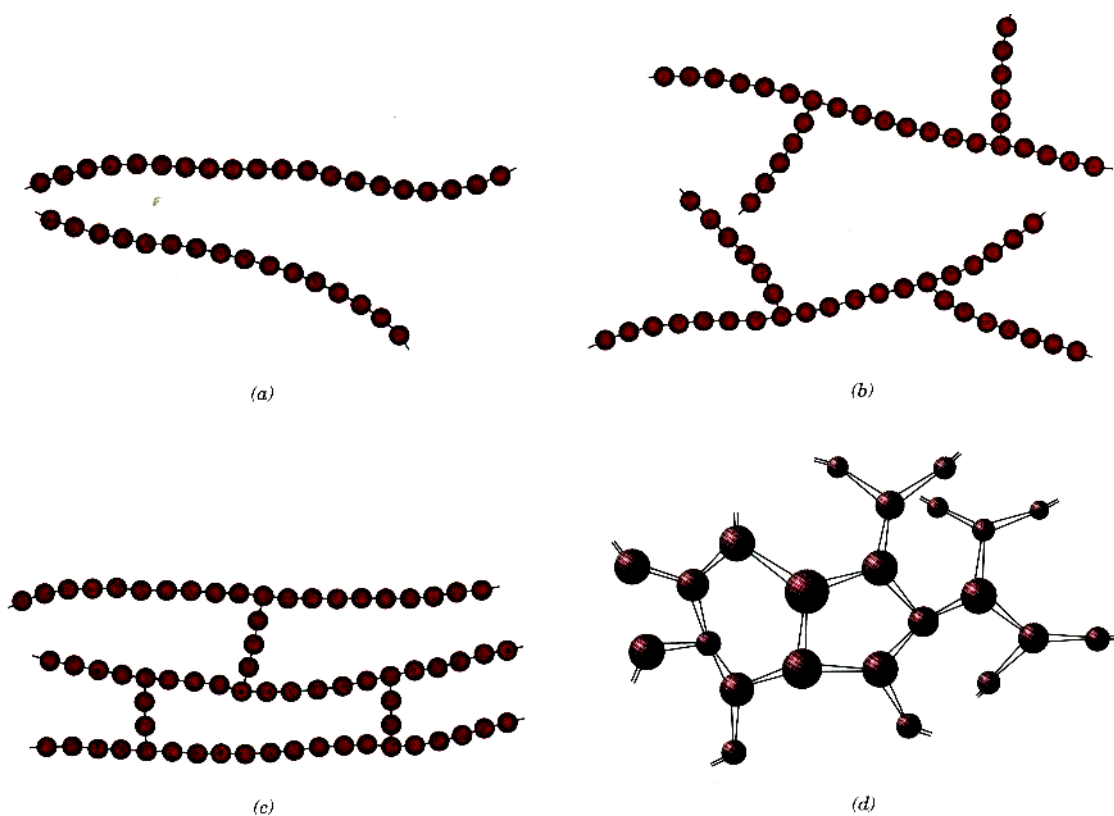
Z chemicko – technologického hlediska dělíme polymery na *polymeráty*, *polykondenzáty* a *polyadukty*.

Přehled nejvýznačnějších druhů polymerů a jejich vlastností spolu se způsobem jejich použití lze nalézt např. ve vynikající knize Sodomka, L., Fiala, L.: *Fyzika a chemie kondenzovaných látek*.

### 11.3.2. Struktura polymerů.

Polymery jsou tvořeny tzv. makromolekulami, složenými z jednotlivých opakujících se dílců – monomerů. Podle jejich seřazení dělíme polymery na:

*Lineární polymery.* V tomto případě jsou jednotlivé monomery seřazeny za sebou, viz. Obr.11.29. (a), takže vytvoří jednoduchý řetězec. Mezi těmito pružnými řetězci působí slabé Van der Waalsovy vazby ( patří sem polyetylén, polyvinylchlorid, polystyrén, polymetylmetakrylát, nylon a též např. fluorokarbyony).



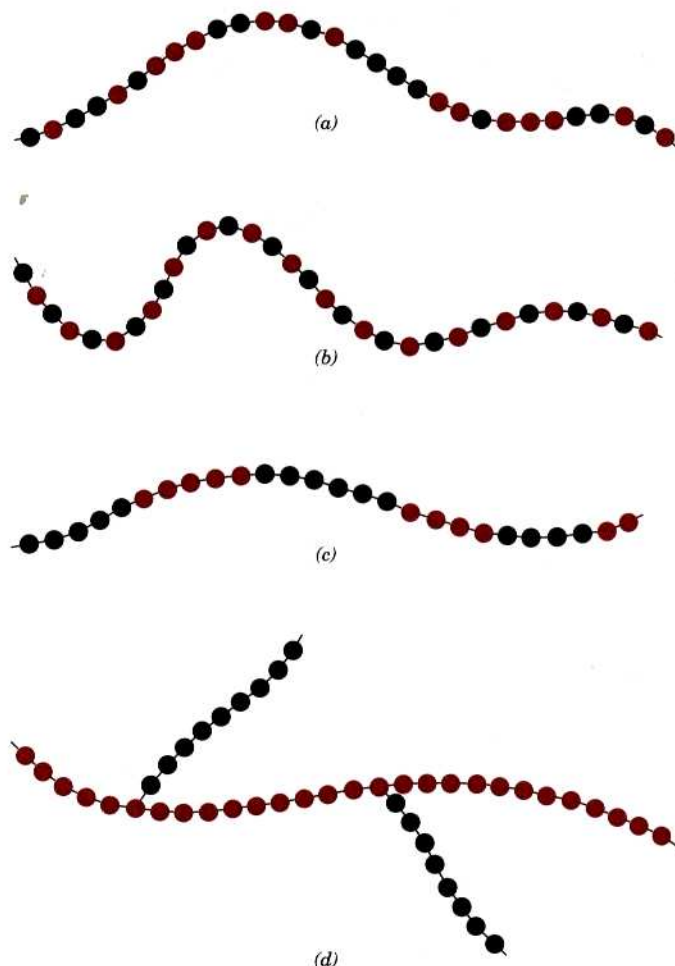
Obr.11 29. Struktura polymerů.

*Rozvětvené polymery.* Struktura těchto polymerů je schematicky znázorněna na Obr.11.29. (b). Jejich makromolekula se vyznačuje hlavním řetězcem, z něhož vystupují postranní „větve“. Celá struktura má menší hustotu, než lineární polymery.

*Polymery se zkříženými články.* Schematický obrázek takových polymerů je uveden na Obr 11.29(c). Z obrázku plyne, že sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silné kovalentní vazby. Sem patří různé elastické materiály, jako je např. přírodní i syntetický kaučuk.

*Síťované polymery.* Trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby vytvářejí trojrozměrnou síť (Obr.11.29(d)). Tyto polymery mají zajímavé mechanické vlastnosti. Patří sem epoxidy a fenolformaldehydy.

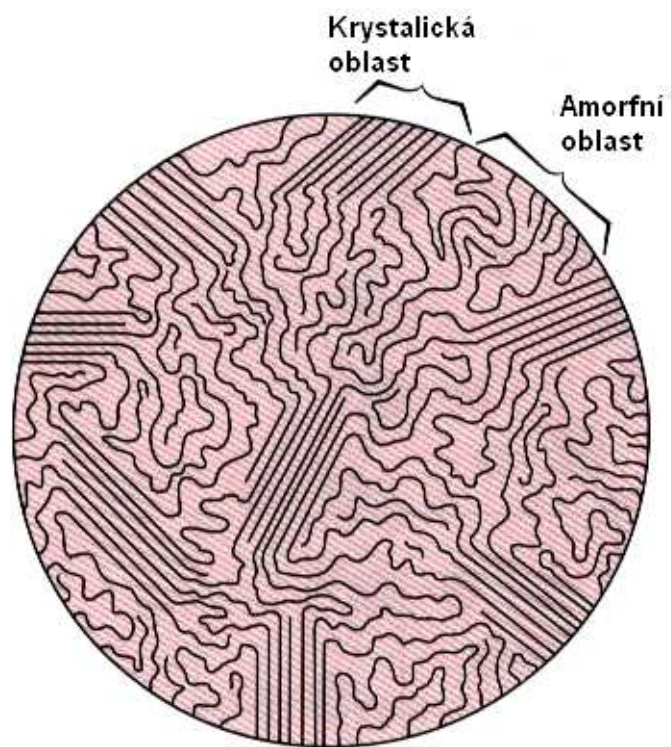
*Kopolyмеры.* Tyto polymery vznikají polymerací více než jednoho druhu monomerů. Tyto monomery se mohou střídát buď náhodně, nebo střídavě. Různé struktury kopolymerů jsou znázorněny na Obr.11.30.



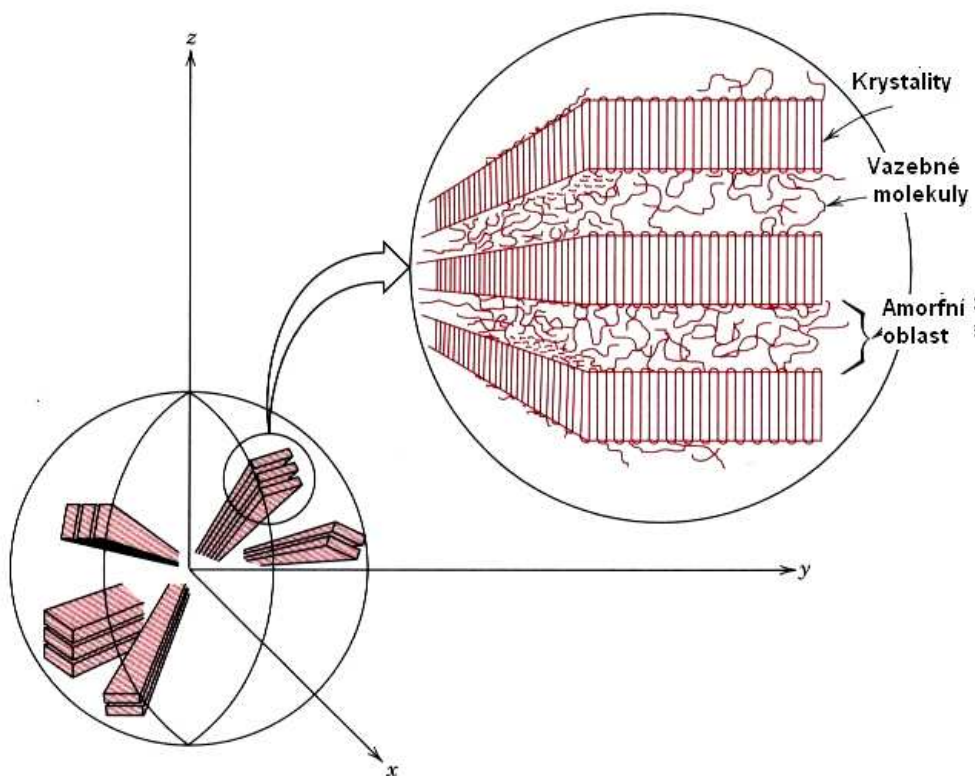
Obr.11.30. Struktura kopolymerů.

*Krystalické a semikrystalické polymery.* Velká délka makromolekul je na překážku jejich úplné krystalizaci. Přesto i u polymerů pozorujeme krystalický stav takový, že makromolekuly jsou pravidelně uspořádány v omezeném objemu (Obr.11.31.). Protože jsou uspořádány jenom částečně, hovoříme také o semikrystalickém stavu. Mnohé polymery, krystalizující z taveniny, vytvářejí tzv. *sférolity* (Obr.11.32), které mají, jak zní jejich název kulovitý tvar. Na Obr.11.33. je ukázán takový sférolit přírodního kaučuku (elektronový mikroskop, zvětšeno 30 000 x).



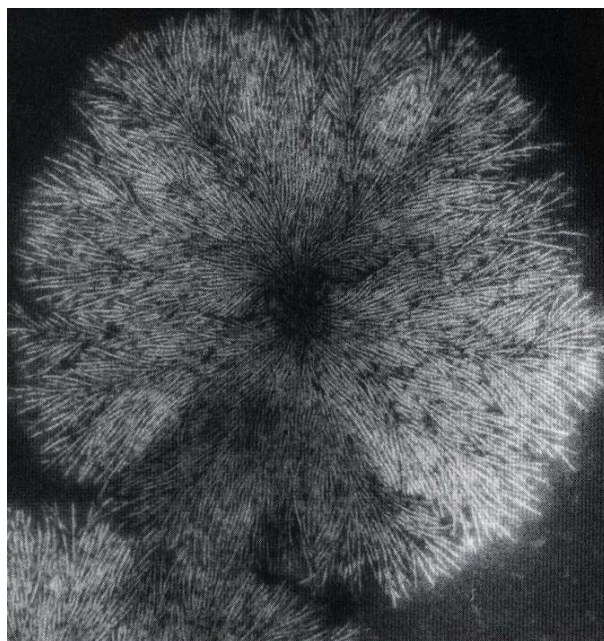


Obr.11. 31. Semikrystalický polymer.



Obr.11.32. Sfěrolit

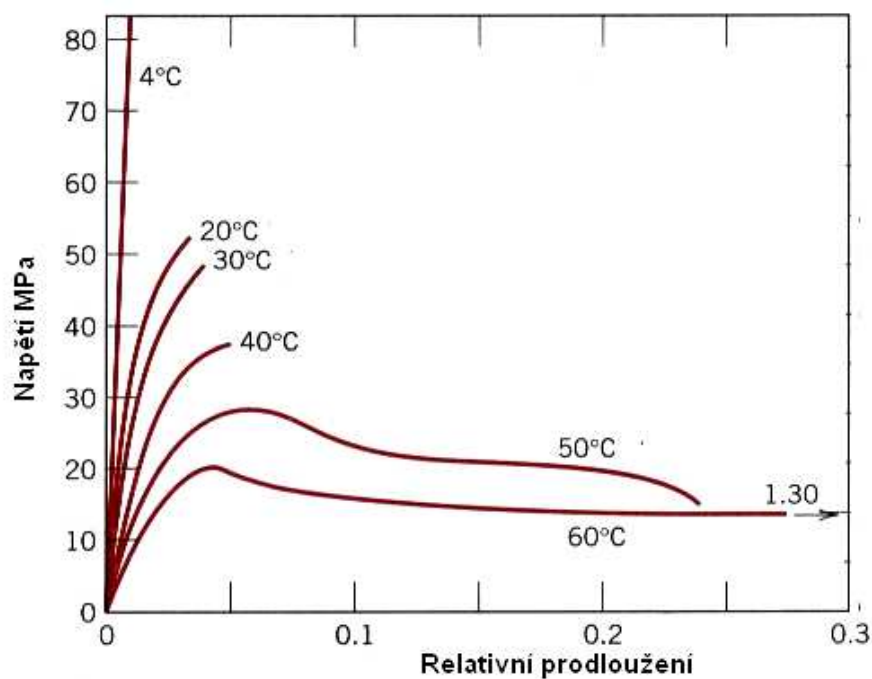




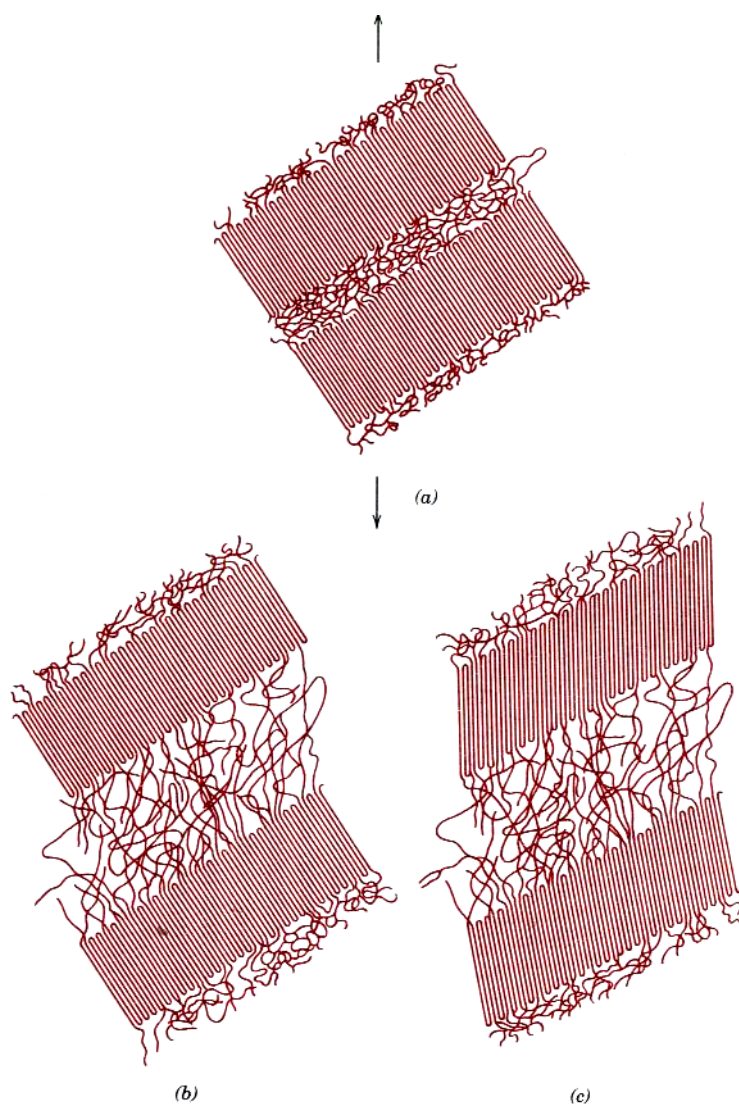
Obr.11.33.. Sférolit kaučuku.

### 11.3.3. Vlastnosti a technologie polymerů.

*Mechanické vlastnosti* polymerů jsou velmi rozdílné a silně závislé na teplotě (Obr.11.34). Názorný mechanismus elastické a plastické deformace polymerů je názorně ukázán na Obr.11.35 a 11.36.) .



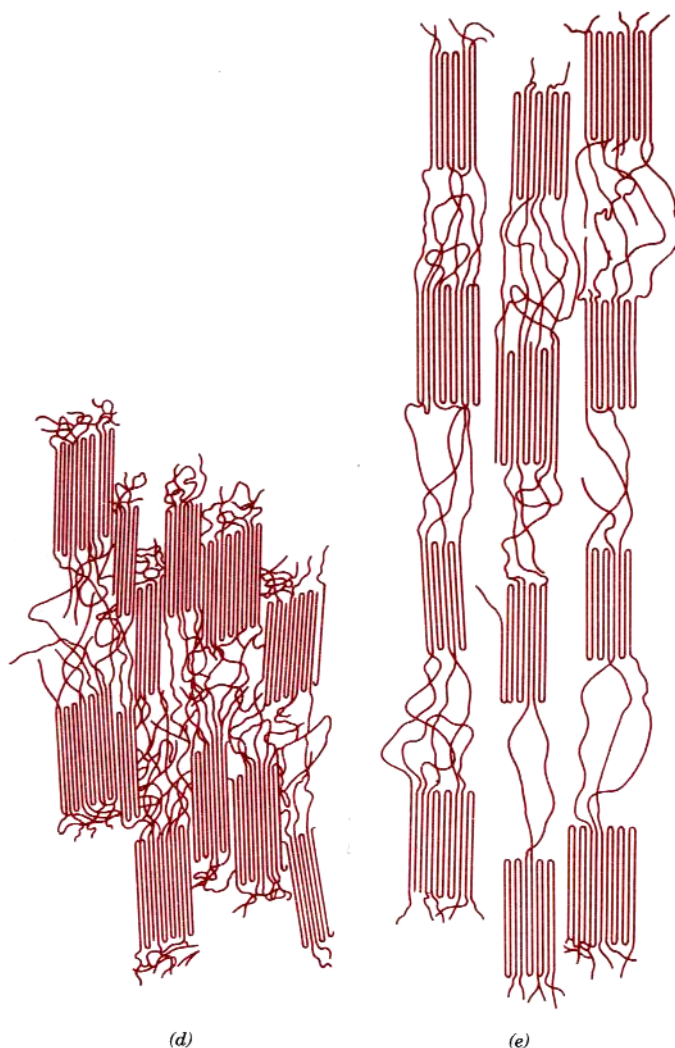
Obr.11.34. Teplotní závislost mechanických vlastností polymerů.



Obr.11. 35. Schematické znázornění elastické a počáteční plastické oblasti deformace polymerů

Na počátku deformace odpovídá struktura polymeru případu (a) na Obr.11.35., tj. v oblasti mezi krystalickými oblastmi se nachází amorfnní oblasti. V prvním stádiu deformace (elastická oblast (b)) dochází k malému prodloužení řetězců, které mezi sebou vážou krystalické oblasti. Během třetího stádia (c) počátek plastické oblasti) dochází k naklánění lamelárních krystalických vrstev. Ve třetím stádiu (d) (Obr.11.36) dochází již k separaci jednotlivých krystalických bloků. Na závěr deformace (e) pak dochází k orientaci krystalických segmentů a řetězců makromolekul v amorfnní oblasti do směru působícího napětí.

**Poznámka:** Sledujeme – li závislost měrného objemu (převrácená hodnota hustoty) na teplotě, dostaneme pro polymer graf, znázorněný na Obr. 11.37. Podle druhu polymeru dostáváme tři typické křivky: křivku A pro zcela amorfnní polymer, křivku B pro polymer semikrystalický a křivku C pro krystalický polymer. Kromě teploty tání v grafu vystupuje i teplota  $T_g$ , tzv. *teplota skelného přechodu*, při níž dochází k výrazným strukturním změnám – k přechodu od pevného k pružnému (kaučukovitému) stavu a tyto změny jsou doprovázeny i změnou makroskopických parametrů (tuhost, měrné teplo, koeficient tepelné roztažnosti).



Obr.11.36. Schematické znázornění konečného stadia plastické deformace polymerů

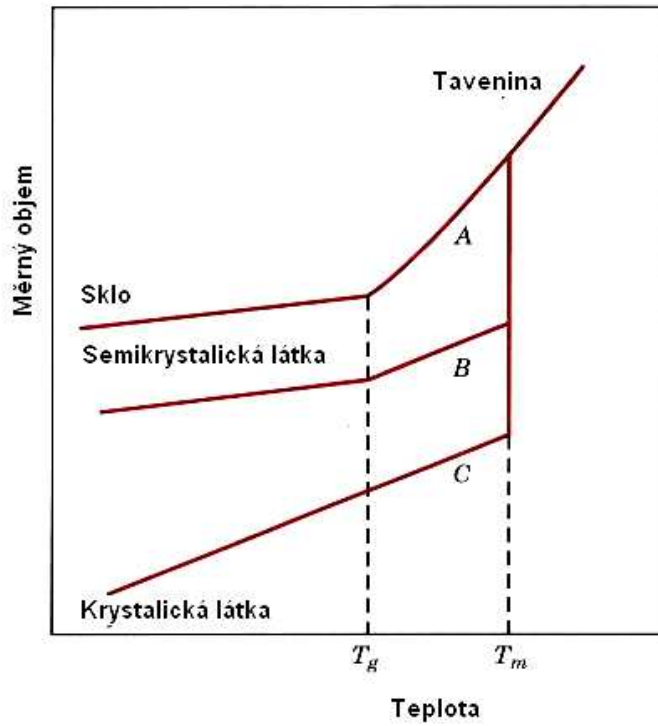
Po fyzikální stránce si lze tuto změnu vysvětlit tak, že při nižších teplotách „zamrzlé“ makromolekuly začnou nad teplotou  $T_g$  konat rotační a translační pohyb.

#### **Výroba polymerů.**

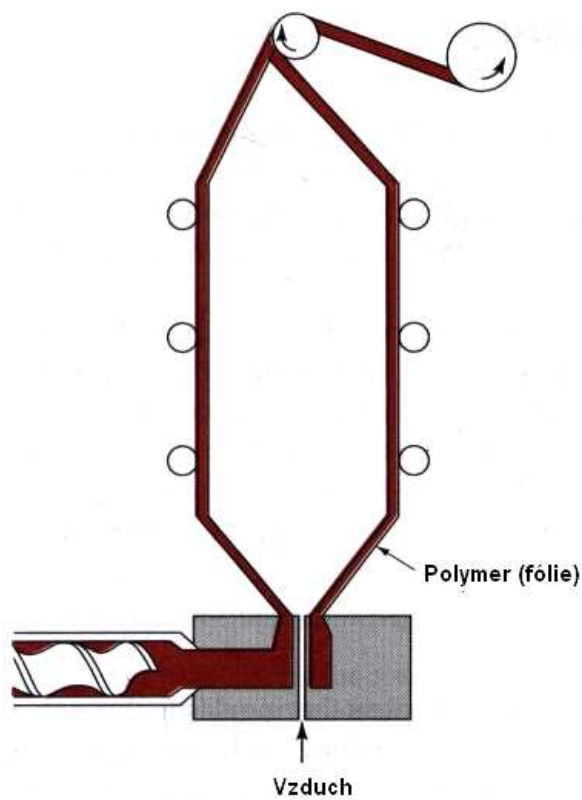
Některé tradiční technologické postupy při výrobě plastů jsou uvedeny na Obr.11.38. a 11.39.

#### **Použití polymerů.**

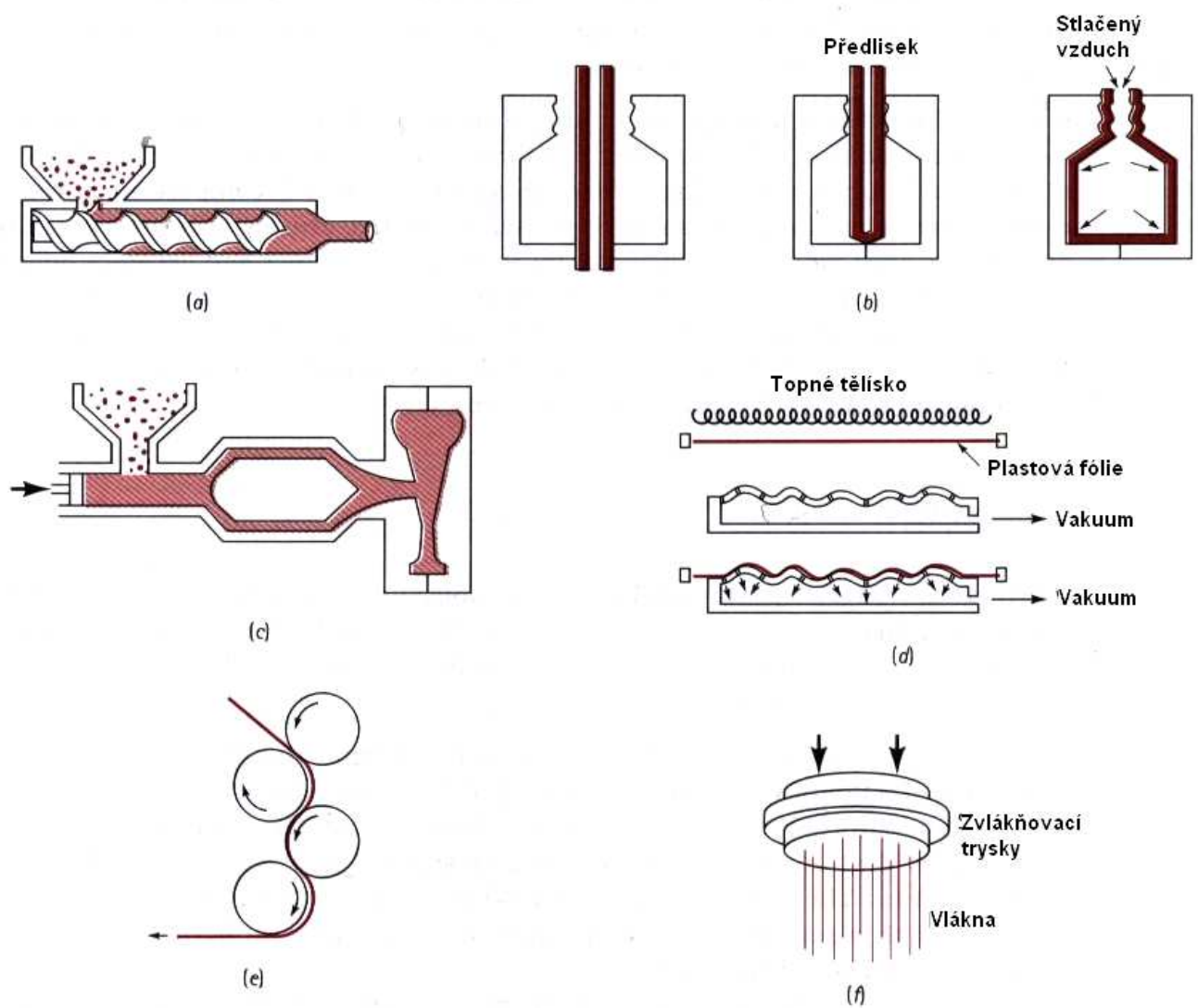
S použitím polymerů se setkáme doslova každý den a na každém kroku. Vyjmenovat jejich využití od domácnosti, průmyslu, zemědělství, automobilismu až po kosmickou techniku by zabralo mnoho místa a ponecháme to na čtenáři.. Na základě dosavadního vývoje a použití polymerů lze konstatovat, že stejně jako keramika a kompozity jsou i plasty významným kandidátem na náhradu oceli v dalším století či tisíciletí.



Obr.11.37. Teplotní závislost měrného objemu polymerů a teplota skelného přechodu.



Obr.11.38. Schéma výroby fólií (např. polyetylenových)



Obr.11.39. Technologie výrobků z plastů.

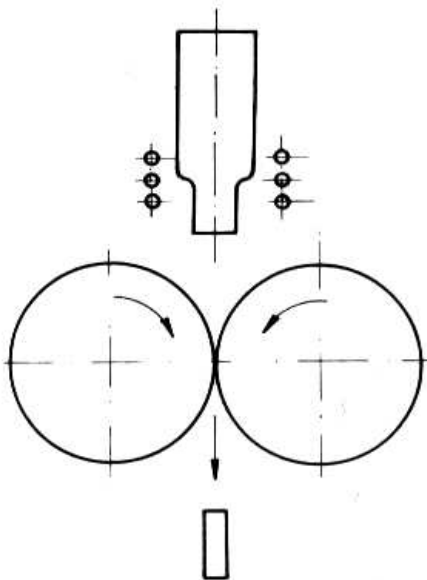


## 12. Perspektivní materiály

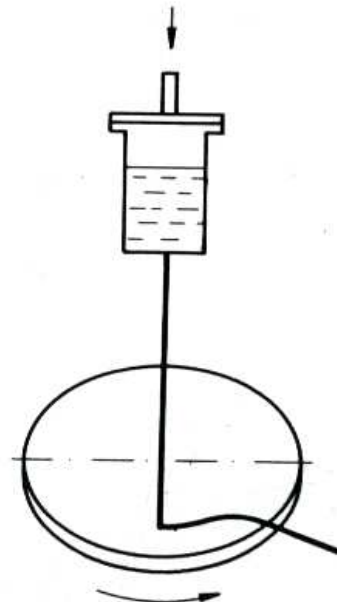
Pod pojmem „perspektivní materiály“ budeme dále chápat ty materiály, které jsou již používány v praxi, ale očekává se, že v budoucnu najdou ještě mnohem větší uplatnění, než dosud. Takových materiálů je velké množství a uvedeme pouze ty, které mají návaznost na látku, vyloženou v předcházejících kapitolách.

### 12.1. Kovová skla

Již dříve jsme uvedli, že kapalná fáze se od fáze pevné liší mimo jiné zejména uspořádáním. Vyberme si jako příklad dvě pevné látky, sklo a kov. Pokud obě látky roztavíme, budou mít obě amorfnní strukturu, typickou pro kapaliny. Po ochlazení pod teplotu tuhnutí si sklo zachová strukturu amorfnní, ale kov zkrystalizuje. Příčinou tohoto odlišného chování při tuhnutí je zřejmě (kromě jiných důvodů) velikost částic, tvořících případnou krystalickou strukturu a tím pádem viskozita dané kapaliny (taveniny). V případě kovů jsou to atomy (Obr.3.3 a 3.4), v případě skel poměrně dosti velké molekuly (Obr.3.13). Proto je běžná rychlost chlazení pro roztavené sklo příliš velká (molekuly nestačí vytvořit krystalickou strukturu), zatímco pro kov je dostatečná. Z tohoto velmi názorného (a tím asi nepřilíš dokonalého) kvalitativního rozboru docházíme k závěru, že chceme – li vyrobit amorfnní kov, musíme ho ochlazovat velmi rychle (aby atomy nestačily „naskákat“ do mřížových bodů krystalové struktury). Výpočty a experimenty ukazují, že rychlost ochlazování by měla být řádu  $10^5 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  (tedy  $\sim 100 \text{ K}/\mu\text{s}$ ), což je rychlost skutečně vysoká, které u objemových předmětů nelze nikdy z pochopitelných důvodů dosáhnout (brání tomu tepelná vodivost kovů). Lze toho však dosáhnout v případě tenkých pásků, drátků a prášku. V praktickém provedení vyrábíme například pásky tak, že proud tekutého kovu lijeme mezi dva mēděné a dobře vyleštěné, kapalným dusíkem chlazené válce, otáčející se proti sobě a „lisující“ a zároveň chladící tenký proud kovu. Různé obměny této metody jsou uvedeny na Obr. 12.1 – 12.4.

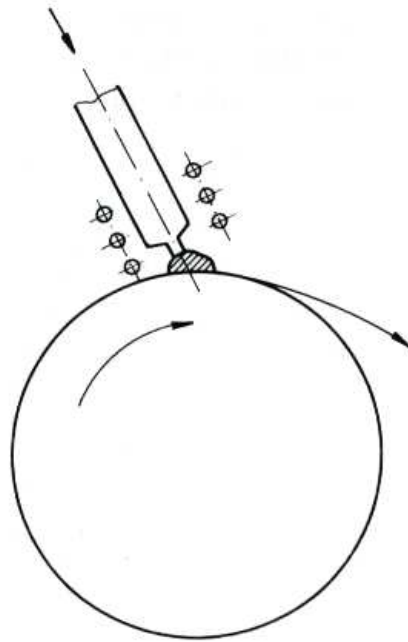


Obr.12.1. Výroba kovových skel litím mezi dva chlazené válce.

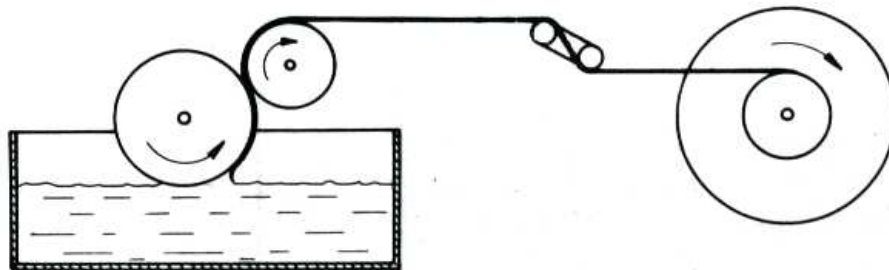


Obr.12.2. Výroba kovových skel litím na chlazený rotující kotouč.

Jak plyne z tohoto obrázku, není tato technologie nijak náročná a proto lze v současné době vyrábět již poměrně značné množství kovových skel ve tvaru drátků či pásků.



Obr.12.3. Výroba kovových skel litím na jeden chlazený kovový buben.



Obr.13.4. Výroba kovových skel z taveniny.

### Vlastnosti kovových skel.

Amorfní struktura kovových skel vylučuje přítomnost dislokací, které jsou „produktem“ krystalického stavu a proto nedojde ani k plastické deformaci skluzem dislokací. Z toho důvodu mají kovová skla vysokou tvrdost (~ 1000 HV) a mez pevnosti řádu 2000 – 3000 MPa. Mají i zajímavé vlastnosti magnetické, které je předurčují k použití v elektrotechnickém průmyslu. Pozoruhodná je i jejich korozivzdornost, mnohem lepší, než mají nejlepší nerezové oceli (důvodem je opět nepřítomnost dislokací - dislokace totiž končí a začínají na povrchu krystalu a tam jsou reprezentovány atomem s volnou vazbou z hrany dislokace, který se ochotně naváže např. na atom kyslíku). Přestože lze kovová skla vyrobit pouze jako drátky, pásky, nebo prášek, nacházejí stále větší upotřebení v technické praxi (kvalitní výztuha pneumatik, kompozitní zpevňující vlákna ve vysokotlakých trubkách a dokonce i jako armatura ve speciálním betonu).

## 12.2. Uhlík

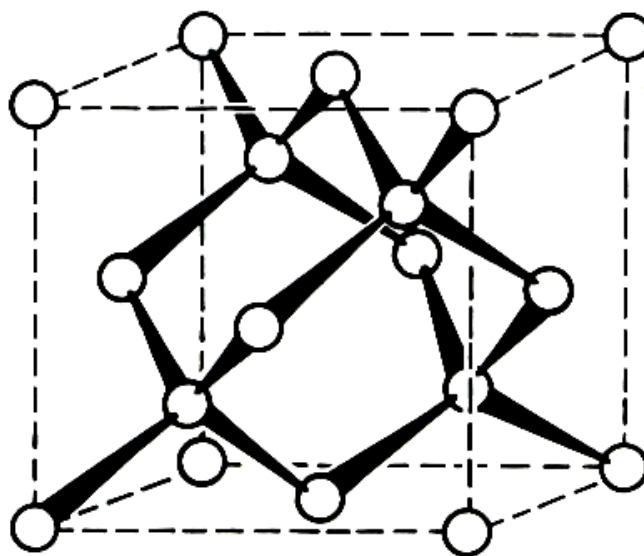
Uhlík byl znám člověku již v pravěku jako dřevěné uhlí a saze, ale zjištění, že se jedná o prvek, bylo potvrzeno mnohem později, až v 18. století. V té době byly též určeny vztahy mezi uhlíkem, uhličitany, oxidem uhličitým, diamantem a grafitem.

Uhlík se vyskytuje jednak jako volný prvek (grafit, saze, uhlí, diamant) a jednak ve sloučeninách, uhličitanech (zejména s Ca a Mg). Odhady celkového výskytu uhlíku v litosféře jej s jeho 180 ppm kladou na 17. místo (za Ba, Sr, S aj., ale před Zr, V, Cl, Cr. aj.).

V současné době dochází k bouřlivému rozvoji fyziky a chemie uhlíku, jehož tradiční použití jako paliva je rozšiřováno na využití při výrobě umělých diamantů, akustických i chemických senzorů, polovodičů, supravodičů, magnetů nového typu, atd. Kromě jeho tradičních modifikací (saze, grafit, diamant) byly objeveny nové modifikace (vlákna, fullerény, fulerity, fuleridy a karbyny).

### 12.2.1. Krystalové modifikace uhlíku:

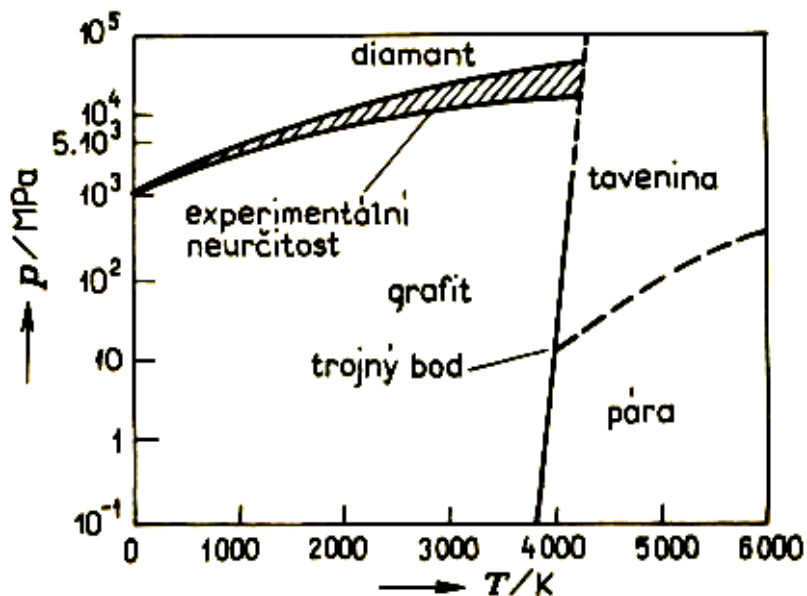
*Diamant* vytváří stejně jako Ge a Si kubickou mřížku (Obr.12.5.), kterou nazýváme v tomto případě „diamantovou“. Kromě této struktury vytváří uhlík i tzv. „diamantupodobné“ struktury (vrstvy sklovitého uhlíku).



Obr.12. 5. Diamantová mřížka.

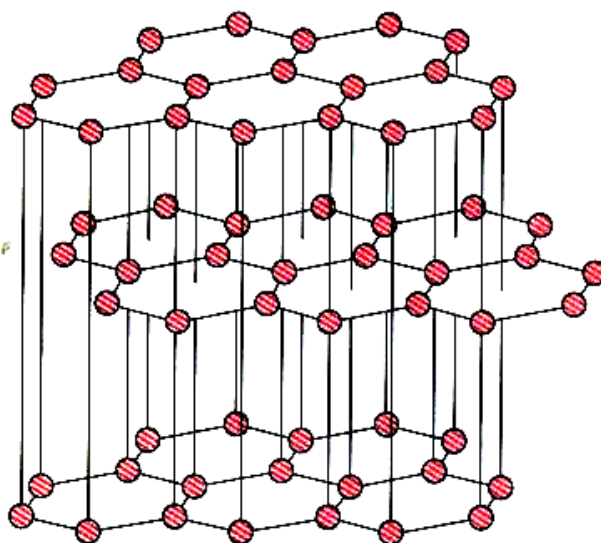
Důkaz, že diamant je modifikací čistého uhlíku, podal již v 18. století významný francouzský chemik Antoine Lavoisier tak, že diamant spálil (za vysokých teplot). Fyzikovi P.W. Bridgmanovi se podařilo převést za vysokého tlaku a při teplotě 3000 °C diamant na grafit. Opačná cesta, kopírující svým způsobem vznik diamantů v přírodě, tj. přeměna uhlíku na diamant se podařila vyřešit až ve druhé polovině minulého století a od 60. let toho století se diamanty vyrábějí synteticky v několika zemích světa, včetně bývalého Československa (Pramet Šumperk). Syntetické diamanty se vyrábějí za tlaků 5 – 10 GPa a teplot 1500 °C – 2000 °C z grafitu. Při této výrobě je nutná přítomnost kovových katalyzátorů (Fe, Co, Ni, Cu). Fázový diagram uhlíku a jeho modifikací je uveden na Obr.12.6.

Diamant je nejtvrďší látka v přírodě, končí jím stupnice tvrdosti. Kromě klenotnictví, kde se používají zejména přírodní diamanty se velké množství diamantů horší kvality spotřebuje při výrobě řezných, brusných a obráběcích nástrojů, při výrobě korunek vrtných souprav, apod.



Obr.12.6. Fázový diagram uhlíku.

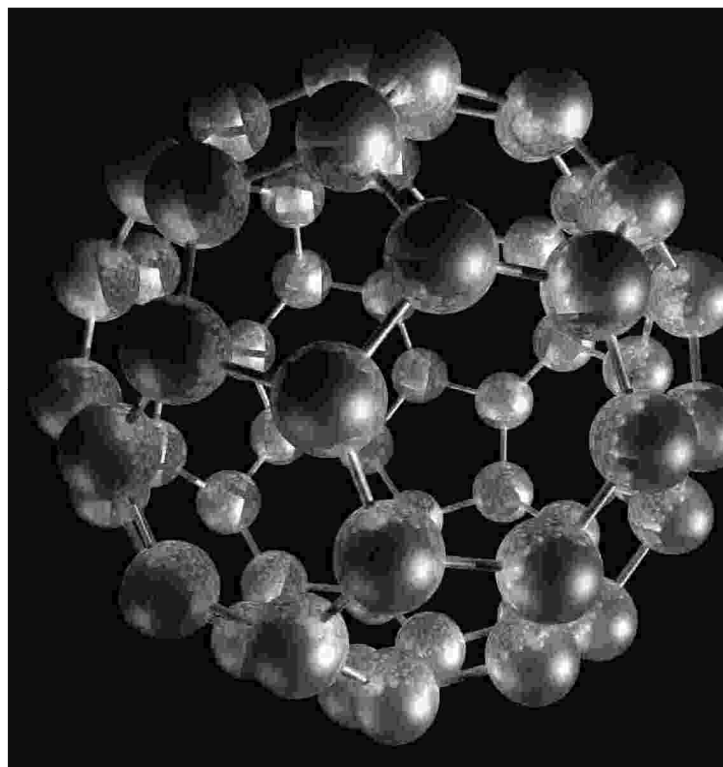
Struktura *grafitu* je znázorněna na Obr.12.7. Jedná se o typickou hexagonální mřížku. Grafit se používá zejména jako tuhé mazivo, při výrobě tužek, apod.



Obr.12.7. Krystalová mřížka grafitu

**Fulerény** jsou velké molekuly, tvořené pravidelnými mnohostěny ve tvaru koule nebo elipsoidu. Nejstabilnější z těchto molekul, fullerén  $C_{60}$  (Obr. 12.8) vytváří komolý dvacetistěn, tzv. s-ikosaedr (12 pravidelných pětiúhelníků a 20 pravidelných šestiúhelníků, takže tvoří 32-stěn, tvarově shodných s kopacím míčem). Existují i další uzavřené uhlíkové molekuly, např.  $C_{40}$ ,  $C_{50}$ ,  $C_{70}$ , a  $C_{78}$ . Vrstvením takových molekul v pořadí ABCABC .... dostaneme f.c.c. nadstrukturu. Látky tohoto druhu nazýváme **fulerity**.

Do dutin uzavřených molekul lze zabudovat další atomy (např. K, Rb aj.) a vzniknou tzv. **fuleridy**. Předpokládá se (a v tomto směru se koná intenzivní výzkum), že jak fullerity, tak i fulleridy mohou být supravodivé za vysokých teplot (tj. vést elektrický proud beze ztrát např. za pokojové teploty). Z molekul  $C_{60}$  lze vyrábět i fullerénové polymery.



Obr.12.8. Molekula fullerénu  $C_{60}$ .

**Použití fullerénů:** z fullerénů lze vyrábět vysokopevnostní vlákna, maziva, molekulární membrány, akustické a chemické senzory, vodíkové zásobníky, polovodiče, supravodiče, baterie s vysokou kapacitou, katalyzátory, etická farmaceutika, aj.

**Technologie výroby fullerénů:** tradiční metodou výroby fullerénů je metoda, využívající vysokoteplotního uhlíkového plazmatu (získaného pomocí laseru, nebo pomocí oblouku), chlazeného proudícím heliem. V odborné literatuře jsou uvedeny další metody výroby fullerénů a protože se jedná o velmi mladé odvětví vědy, nebylo jak co do jejich použití, tak i co do způsobu jejich výroby řečeno ještě poslední slovo.



**Uhlíková vlákna:** uhlíková vlákna byla původně vyvinuta v 60. letech 20. století za účelem zpevnování polymerů (vznik kompozitů). Mají velmi nízkou hustotu, vysokou pevnost, vysoký modul pružnosti, snášejí vysoké teploty, jsou antikorózní a chemicky odolná. Využití mají zejména v letecké a kosmické technologii a při výrobě sportovního náčiní.

### 12.3. Titan.

Titan byl objeven jako chemický prvek v roce 1791 chemikem – amatérem Williamem Gregorem, farářem z Cornwallu. Německý chemik M.H. Claproth jej pojmenoval čtyři roky poté po Titánech, dětech Nebe a Země, odsouzených k životu ve skrytých ohních Země.

Titan náleží mezi hojně rozšířené prvky v zemské kůře (po hliníku a železe je to zde třetí nejrozšířenější kov). Přesto tvoří poměrně málo vydatná ložiska (ilmenit, rutil) a je v litosféře rozptýlen.

Pouhé nahlédnutí do fyzikálních tabulek nám podá první informace o vynikajících mechanických vlastnostech titanu. V Tab.12.1. uvádíme tři z těchto vlastností (hustotu  $\rho$ , modul pružnosti v tahu  $E$ , mez pevnosti  $\sigma_k$  a tvrdost podle Brinella  $H_B$ ) pro hliník, titan a železo (tři nejrozšířenější kovy a významné konstrukční materiály ve strojírenství, stavebnictví, letecké technice apod.).

Tab.12.1.

Prvek	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$E \cdot 10^{-10}$ (Pa)	$\sigma_k \cdot 10^{-7}$ Pa	$H_B$
Al	2700	7,07	7	20
Ti	4510	11,6	30	155
Fe	7874	21,2	20	50

Na základě porovnání hodnot, uvedených v této tabulce docházíme k závěru, že titan má výjimečně dobré mechanické vlastnosti. Je téměř tak lehký jako hliník a svojí pevností a tvrdostí převyšuje ocel. K dalším jeho vynikajícím vlastnostem patří vysoká korozivzdornost a skutečnost, že je velmi dobře snášen tkání lidského těla.

Z výčtu zde uvedených vlastností titanu plyne i oblast jeho použití:

- V lékařství jako náhrada lidských kostí, kloubů a zubů.
- V chemickém průmyslu díky jeho antikorozním vlastnostem na různá zařízení chemického průmyslu, přístroje, potrubí, atd.
- V kosmické a letecké technice.
- Ostatní využití, např. ve šperkařství, hodinářství, při výrobě jízdních kol, součástek automobilů, atd.

Velmi zajímavé vlastnosti má i slitina 50wt% Ni+50wt%Ti, zvaná *nitinol*, jedna z tzv. Onsagerových slitin. Tato slitina je významná svou vlastností, tzv. tvarovou pamětí, které lze využít opět v medicíně, strojírenství a kosmické technice. Ze stručného výčtu výjimečných vlastností titanu plyne, že je vážným kandidátem, po němž by mohla být nazvána další epocha vývoje lidstva – doba titanová.

## 12.4. Superplasticita.

V kapitole 6 jsme uvedli, že po překročení meze pružnosti se většina materiálů deformuje plasticky, tj. dojde k nevratné změně tvaru (např. k prodloužení vzorku). Plastická deformace je závislá na několika faktorech (např. na teplotě), ale zpravidla ani při vysokých teplotách nedosahuje relativní prodloužení vyšší hodnoty, než je 10% (neboť dříve dojde k lomu).

Přesto je znám jev, zvaný *superplasticita*, vyznačující se tím, že relativní prodloužení dosahuje hodnot několik set procent (jinými slovy, vzorek délky  $l$  se protáhne na několiknásobek), aniž dojde k jeho přetržení. Aby bylo možno daný kov či slitinu deformovat superplasticky, je třeba splnit dvě základní podmínky:

- Materiál musí mít velmi jemné zrna. Dosáhneme toho protlačováním materiálu (Obr.5.7.c,d).
- Proces deformování musí probíhat v určitém teplotním intervalu, závislém na materiálu, který deformujeme ( $0,5 - 0,65 T_M$ , kde  $T_M$  je teplota tání materiálu v K). Rychlost deformování musí být malá.

Superplastická deformace má i svůj význam praktický. Při výrobě některých součástek, které mají složitý tvar, dochází při jejich opracování (vrtání, soustružení, frézování) k velkému odpadu materiálu. Navíc je takové opracování energeticky náročné. Proto se ukazuje jako výhodnější převést materiál do superplastické modifikace (tj. zjemnit zrna a ohřát jej na žádanou teplotu), poté ho „nalisovat“ do formy žádaného tvaru, nenáročnou tepelnou úpravou ho rekrystalizovat, aby byl tvrdší a teprve potom ho mechanicky upravit na výsledný tvar.

Tímto technologickým postupem jsou v současné době vyráběny nejen některé kovové výrobky komplikovanějšího tvaru (např. automobilové karburátory), ale i výrobky z keramik ( $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ) a intermetalických sloučenin ( $Ni_3Si$ ).

## 12.5. Supravodivost.

Závislost elektrického odporu vodiče na jeho rozměrech (délce  $l$  a průřezu  $S$ ), materiálu a teplotě, je dána vztahem

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (12.1)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor vodiče, závislý na jeho materiálu a teplotě.

Teplotní závislost měrného odporu většiny kovů je taková, že při teplotě velmi blízké 0K má odpor jistou malou hodnotu a s rostoucí teplotou odpor roste prakticky lineárně. V roce 1911 však zjistil holandský fyzik H. Kammerling Onnes, že měrný odpor některých kovů prudce klesá na nulovou hodnotu již při teplotě vyšší, než je 0 K (tzv. kritická teplota  $T_C$ ). V Tab.12.2. jsou uvedeny hodnoty této teploty pro některé kovy.

Stejný badatel zjistil, že supravodivost se dá narušit působením magnetického pole o jisté prahové hodnotě ( $B_C$ ). Jev supravodivosti byl intenzivně zkoumán jak po experimentální, tak i po teoretické stránce. Za objasnění jevu supravodivosti byla udělena Nobelova cena za fyziku J.Bardeenovi, L.Cooperovi a J.R.Schriefferovi.

Tab.12.2.

Kov	$T_C$ (K)	Kov	$T_C$ (K)	Kov	$T_C$ (K)
Al	1,18	In	3,40	Sn	3,72
V	5,38	Ti	0,39	La	6,00
Zn	0,875	U	0,68	Hg	4,15
Tl	2,39	Ta	4,48	W	0,0012

Velký význam má jev supravodivosti po stránce technického využití. V tomto stavu má kov nulový odpor a vede tedy elektrický proud beze ztrát, takže by mohl přivést výkon celé elektrárny tenkými vodiči z libovolné vzdálenosti (ztráty výkonu při vedení elektrického proudu běžnými vodiči dosahují desítek procent). Bohužel dosud se nepodařilo získat kovový materiál (slitinu), který by měl hodnotu kritické teploty vyšší, než 25 K (např.  $Nb_3Sn$  má  $T_C = 18,3$  K,  $Nb_3Ge$  má  $T_C = 23,2$  K). V praxi to znamená, že supravodivý vodič musí být umístěn v ose trubice, ochlazované tekutým heliem. Vnější plášť této trubice musí být dále ochlazován tekutým dusíkem a ten samozřejmě musí být dobře izolován dalším obalem od vnějšího prostředí. Co by se ušetřilo na ztrátách ve vedení, to se spotřebuje na zkapalňování obou plynů. Proto se jevu supravodivosti v kovech a jejich slutinách používá zejména v laboratořích k získání extrémních magnetických a elektrických polí a též v kosmické technice.

V posledních desetiletích však svítla naděje na získání supravodivých materiálů jiného typu, založených na bázi keramik. Tak například v roce 1986 byla na keramickém materiálu  $Ba_xLa_yCu_zO$  naměřena kritická teplota 30 K a nedlouho poté po náhradě lantanu yttriem, bariem a stronciem vzrostla postupně na 95 K a dokonce až na 125 K. Technologie přípravy takových keramických supravodičů je velmi jednoduchá, bohužel v současné době neexistuje úplná teorie vysokoteplotní supravodivosti, která by vedla bezpečně k experimentálnímu cíli – výrobě supravodiče s kritickou teplotou, alespoň o 100 K vyšší, než je teplota pokojová. Proto se experimentální výzkum zatím ubírá cestou extenzivní, tj. cestou náhodných pokusů.

Dalšími možnými materiály pro vysokoteplotní supravodiče by mohly být lineární modifikace uhlíku, tzv. karbyny.

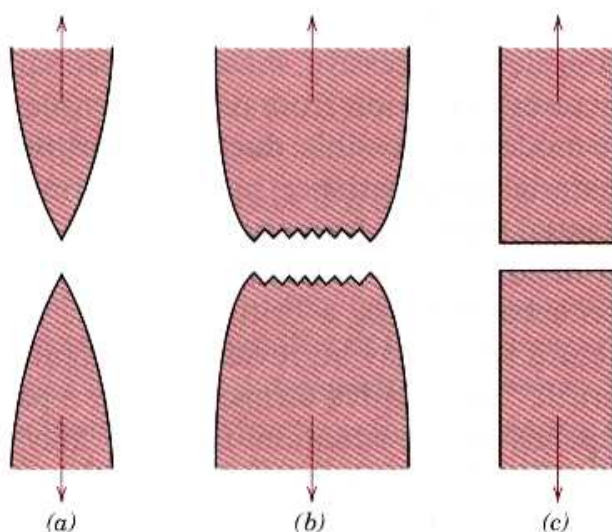
Závěrem lze říci, že oblast výzkumu vysokoteplotních supravodičů se nachází v centru pozornosti experimentátorů i teoretiků v mnoha zemích světa, takže se zde dá očekávat v blízké budoucnosti kvalitativní pokrok, který bude mít zásadní význam pro celé lidstvo.

## 13. Lom, únava a tečení materiálu.

### 13.1. Lom.

Procesy porušování kovových materiálů mají velký význam pro praxi, neboť na nich závisí spolehlivost konstrukcí různého typu (budov, mostů, plynovodů a ropovodů, vozidel, atd.). Vznik lomu vyžaduje porušení vazeb a oddělení dvou částí materiálu. U monokrystalů to je možné např. usmyknutím, doprovázeným velkou plastickou deformací, vyžadující poměrně značnou energii (tzv. *houževnatý* či *tvárný* lom). Druhou možností je lom štěpením, který nenese známky plastické deformace (lom *křehký*, neboli *štěpný*). Dalšímu druhu lomu je *lom koroze pod napětím* a *creepový lom* (creep = tečení materiálu).

V polykrystalických kovech je díky různé orientaci zrn a přítomnosti hranic zrn situace složitější. K šíření lomu zrn (transkrystalický lom) přistupuje lom po hranicích zrn (interkrystalický lom). Vše dále ovlivňuje struktura kovů, přítomnost poruch, stav napjatosti, způsob a podmínky zatěžování, teplota, atd. Schematicky jsou tyto případy uvedeny na Obr.13.1.

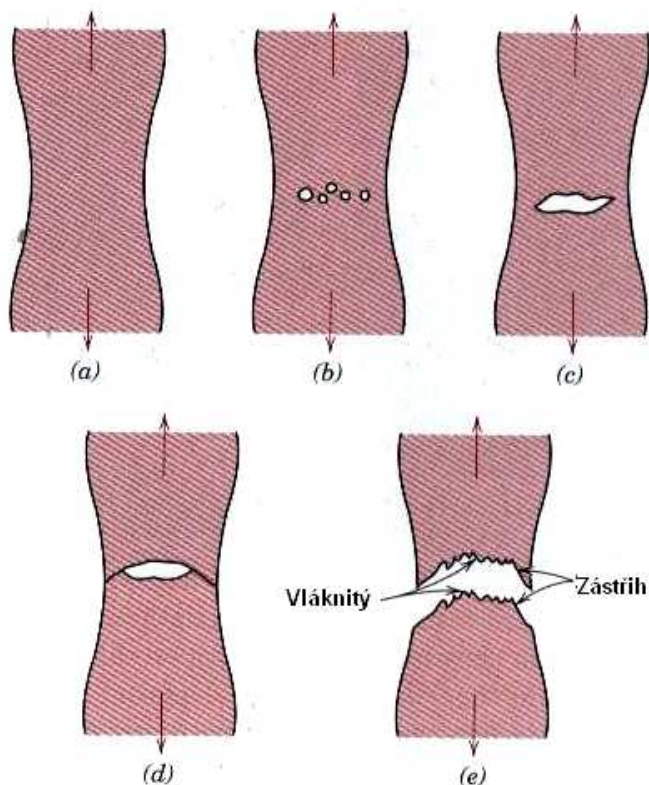


Obr.13.1. (a) Plastický lom, (b) Houževnatý lom, (c) Křehký lom.

#### 13.1.1. Houževnatý lom.

V reálných polykrystalických materiálech dochází ke vzniku nakupení dislokací před překážkami (hranice zrn, precipitáty). V místech takových nakupení existuje koncentrace napětí, které může mít za následek vznik mikrotrhliny podél překážky. Mikrotrhliny v průběhu další plastické deformace rostou a spojují se, takže dojde ke vzniku velké tzv. magistrální trhliny. Ta se šíří k obvodu tělesa vnitřkem zrn a k usmyknutí okrajových částí dojde v rovině maximálního smykového napětí, která svírá úhel přibližně  $45^{\circ}$  se směrem osového napětí. Tak vzniká lomová plocha, která má charakteristický tvar číšky (Obr.13.2 a 13.3.). Ve střední části je lomová plocha tvořena přibližně rovnoosými mikroskopickými jamkami (Obr.13.4). Jamky rostou z míst, kde se porušila působením napětí soudržnost mezi

částicemi druhé fáze (např. karbidů) a matricí. Můstky mezi sousedními jamkami se vytahují, až se usmyknou a vytvoří část lomové plochy. Lom pak má obvykle matný vzhled.

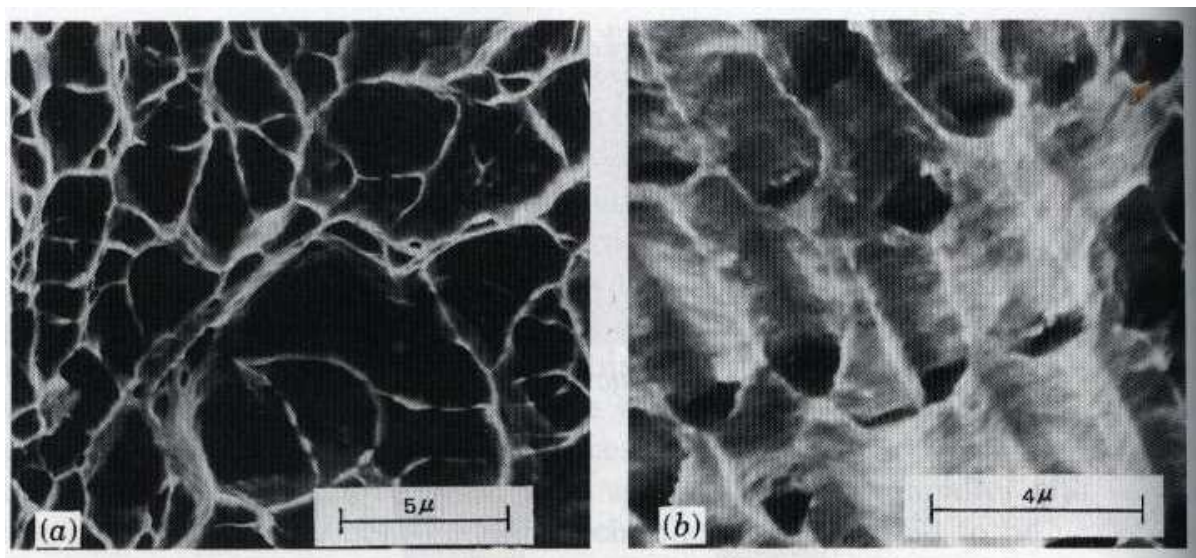


Obr.13.2. Různá stádia tvárného lomu: (a) Vznik krčku, (b) Tvorba kavit, (c) Vznik magistrální trhliny, (d) Šíření trhliny, ( e ) Lom.



Obr.13.3. Typický tvárný lom (tvar čišky).

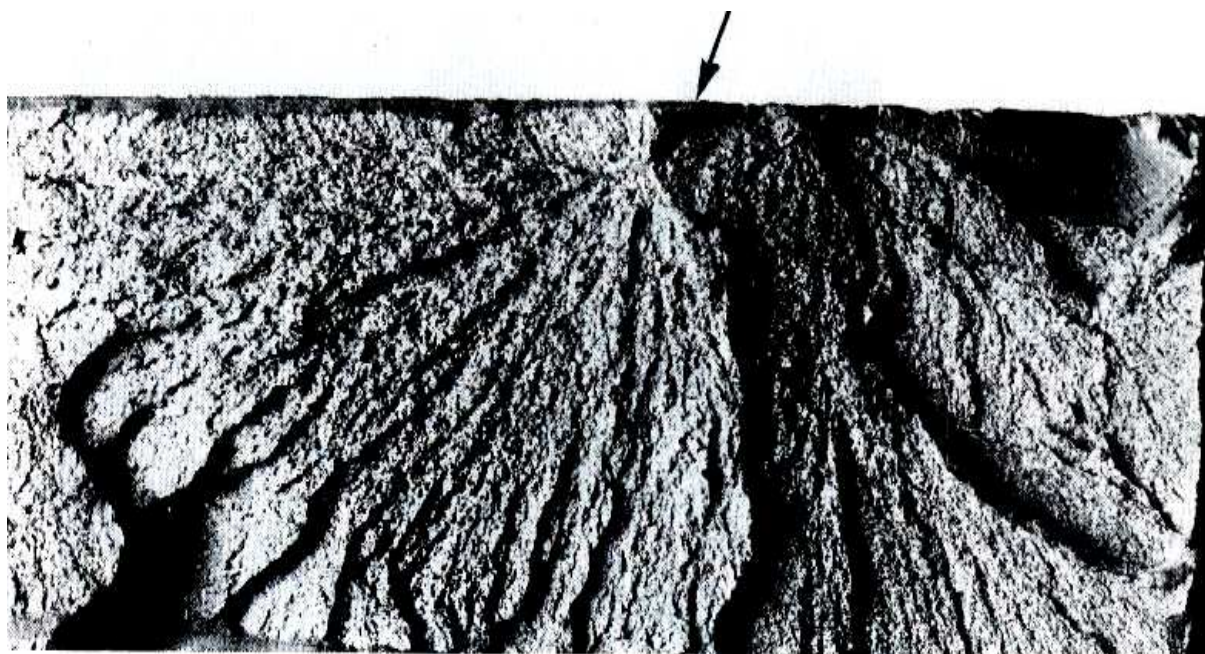




Obr.13.4. SEM fotografie (fraktografie) tvárného lomu.

### 13.1.2. Křehký lom.

Z makroskopického hlediska je křehký lom opakem lomu tvárného. Křehký lom nastává bez větší předchozí plastické deformace, pod makroskopickou mezí kluzu. Šíří se po hranicích zrn, nebo i přes zrna podél krystalografických rovin, nejhustěji obsazených atomy. V tomto případě pozorujeme štěpné plošky – *fasety* s charakteristickou kresbou („říčková morfologie“, „jazyky“, „rybí páteře“). Vzniká propojováním štěpných plošek v rovnoběžných rovinách téhož zrna stupni k nim kolmými. Rozdíly v krystalografické orientaci zrn se vyrovnávají velkými stupni na hranicích. Makroskopicky je lom rovinný a lesklý (Obr.13.5).



Obr.13.5. Typický tvar křehkého lomu (tvar „říčky“). Šipka ukazuje počátek lomu.



Podle současných poznatků jsou zárodkem trhlin buď již existující necelistvosti z výroby a zpracování materiálu, nebo trhlinky, které se tvoří až při zatěžování. Jejich rozměry jsou řádu  $10^{-8}$  m a vznikají následkem nakupení dislokací (již zmíněné stádium nukleace trhlin).

Vlivem deformace, koncentrované před ostrým čelem trhliny se tyto defekty postupně zvětšují (stádium stabilního růstu) a jejich propojením vzniká hlavní (magistrální) trhlina. Po překročení určité délky, kritické při daném napětí, se trhlina rozběhne (rychlostí, řádově rovnou rychlosti zvuku v kovu, tj. asi  $10^3$  m.s<sup>-1</sup>) už nezávisle na vnějším zatížení (stádium nestabilního šíření) a dochází ke křehkému lomu.

### **Srovnání houževnatého a křehkého lomu:**

V podmínkách houževnatého lomu mají kovové materiály dostatečnou plasticitu k tomu, aby se lokální napětí před čelem ostrých trhlinek deformací odbourala (relaxovala). *Stabilní růst* trhlin je pomalý a i po jejich propojení v hlavní trhlinu je nutno pro její šíření až do lomu dodávat zatěžováním energii. Lom v tomto případě nastává při napětích nad mezí kluzu (při statickém namáhání a za běžných teplot). Naproti tomu křehké porušení se rozvíjí od určitého stavu poškození náhle *nestabilním šířením trhliny*. Lom nastává v podstatě bez plastické deformace a za určitých okolností při napětích nižších, než je mez kluzu. Z hlediska bezpečného provozu strojů a konstrukcí mají rozhodující význam podmínky pro zahájení nestabilního šíření trhliny, které již nelze nijak ovládat (tj. kritická délka trhliny při daném napětí, nebo kritické napětí pro danou délku trhliny).

### **Zkouška vrubové houževnatosti:**

Nejrozšířenější zkouškou hodnocení náchylnosti ke křehkému lomu je *zkouška rázem v ohybu*. Zkušebním tělískem je hranolek s vrubem ve tvaru U, nebo V uprostřed jedné strany. Tělísko je při zkoušce zlomeno úderem kladiva (Charpyho kladivo). Celková potenciální energie kyvadla v horní poloze se změní na energii kinetickou v dolní poloze a na energii, potřebnou na deformaci a lom vzorku (Obr.13.6). Zbytek energie se změní na zbytek potenciální energie. Jako *vrubovou houževnatost* definujeme veličinu

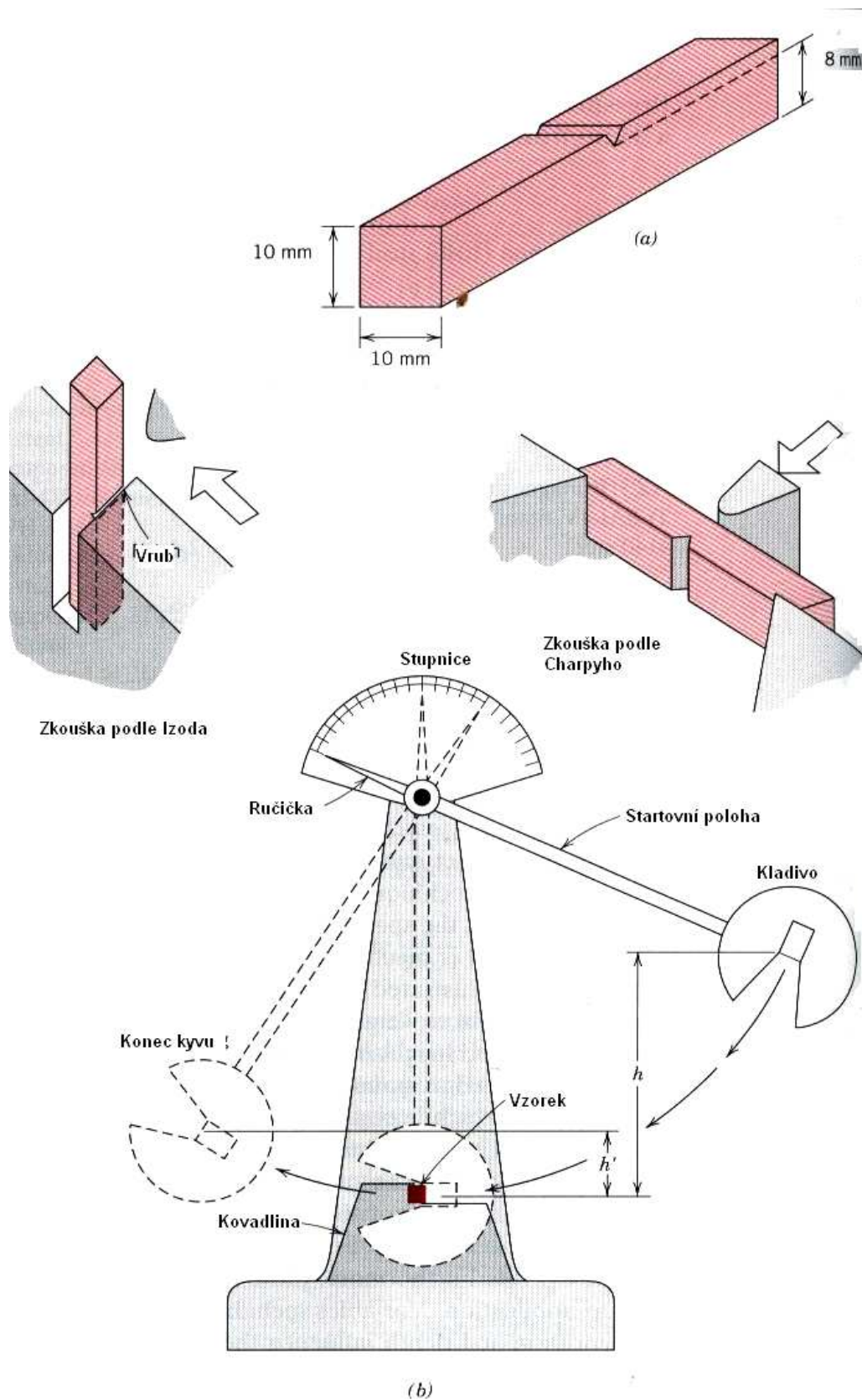
$$KC = \frac{K}{S_0} \quad (13.1)$$

kde  $K$  je práce, potřebná na lom materiálu a  $S_0$  je průřez vzorku.

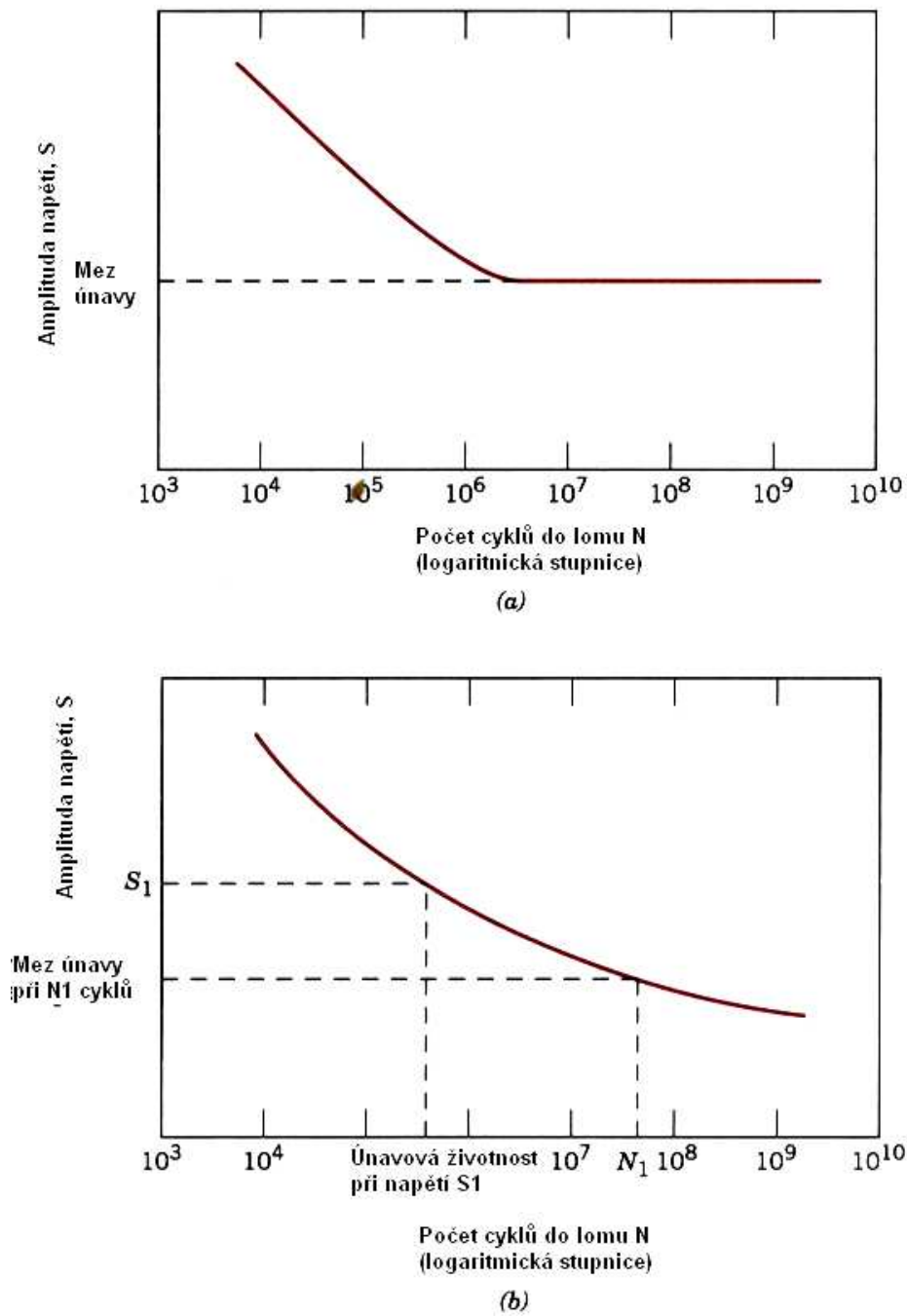
## **13.2. Únava materiálu.**

Většina strojních součástek je namáhána proměnnými silami (hřídele, čepy kol, pružiny, tlaková potrubí, mostní konstrukce, křídla letadel, atd.). Takto namáhané součásti se někdy po určité době provozu porušují při napětích, která jsou značně nižší, než je nejen mez pevnosti, ale i mez kluzu materiálu, zjištěné statickými zkouškami. V takovém případě mluvíme o únavě materiálu a o únavovém lomu. Podle statistik je únava příčinou asi 80% všech poruch strojních dílců v provozu. Proto je poznání podmínek provozu a vzniku únavových lomů velmi důležitou oblastí výzkumu mechanických vlastností pevných látek.

První experimenty únavy materiálů prováděl v letech 1852 – 1870) železniční inženýr August Wöhler v souvislosti s praskáním os železničních vagónů a součástí parních strojů. Dodnes je po něm nazvána základní únavová charakteristika, tzv. Wöhlerova křivka, udávající závislost počtu cyklů do lomu  $N$  na amplitudě napětí  $S$  (Obr.13.7).



Obr.13.6. Zkouška vrubové houževnatosti (Charpyho kladivo).

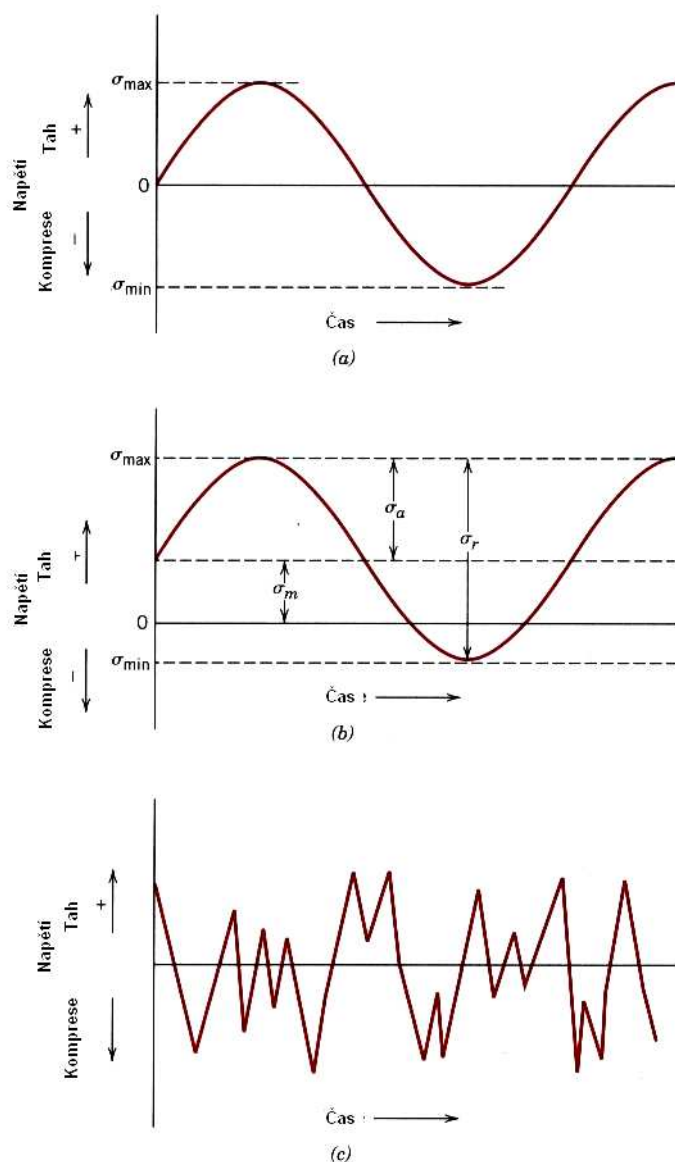


Obr.13.7. Wöhlerova křivka pro materiál (a) vykazující mez únavy a (b) nevykazující mez únavy.

Amplituda napětí, při níž nedojde k lomu ani při vysokém počtu cyklů (řádu  $10^7$ ) při harmonickém zatěžování se nazývá *mez únavy*.

### 13.2.1. Únavový lom.

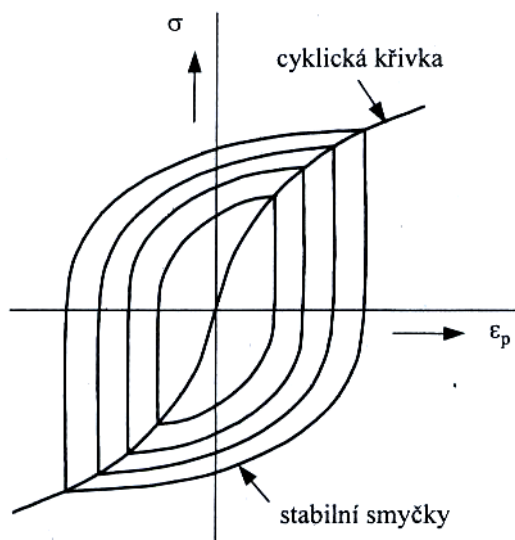
Čistě pružná cyklická deformace (Obr.13.8) nezpůsobí ani po libovolně velkém počtu kmitů vnitřní změny v materiálu. Únavový proces je podmíněn střídavou plastickou deformací, která vede ke zvyšování poruchovosti mřížky, interakci poruch a vzniku poškození.



Obr.13.8. Cyklické zatěžování (a) symetrické (tah – tlak), (b) asymetrické, (c) náhodné.

Poškození kovových materiálů únavou je složitý proces, který je možno rozdělit na tři stádia: 1. Změny v mikrostruktura a poruchovosti mřížky, spojené se změnami vlastností, 2. Vznik zárodků trhlin, 3. Šíření trhlin. Proces končí únavovým lomem, který lze pokládat za čtvrté stádium.

První stádium: roste hustota mřížkových poruch, vznikají pásy s vysokou hustotou dislokací. Makroskopicky se to projeví vnikem tzv. hysterezi smyčky závislosti *výkmit napětí – výkmit plastické deformace*. Plocha smyčky se mění, což značí změnu energie, nevratně absorbované kovem za každý cyklus. Taková křivka (Obr. 13.9) je základní makroskopickou charakteristikou chování materiálu při únavě.



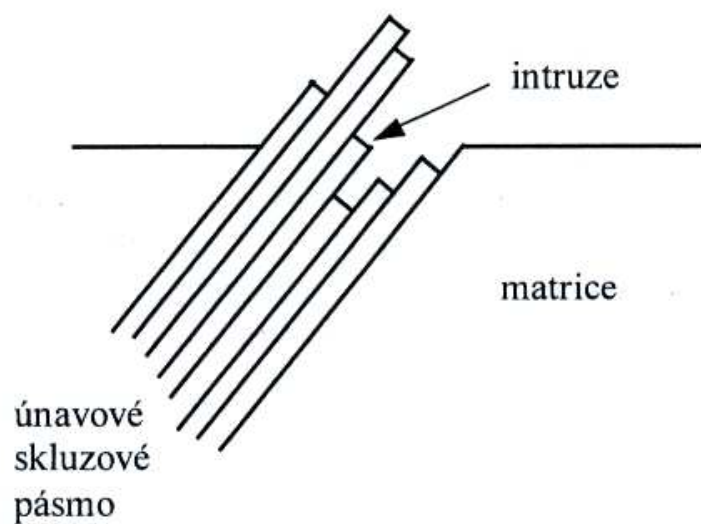
Obr.13.9. Hysterezní křivka při únavě.

Druhé stádium únavy: vznikají zárodky mikrotrhlin a to téměř vždy v povrchové vrstvě, v místě nakupení poruch. Příčinou jsou nedokonalosti povrchu (vruby, vnitřní pnutí, špatné opracování, koroze apod.) a skutečnost, že při únavě materiálu jsou namáhány zejména povrchové vrstvy materiálu. Nejdůležitějším způsobem iniciace únavové trhliny je iniciace v únavových skluzových pásech. Ta vznikají v důsledku intenzivní tvorby nových dislokací, které se v povrchových vrstvách materiálu seskupují do skluzových pásů v rovinách maximálního smykového napětí. Působením napětí dochází v těchto pásech ke vzájemnému pokluzu sousedních rovin, tzv. kartový skluz (Obr.13.10).

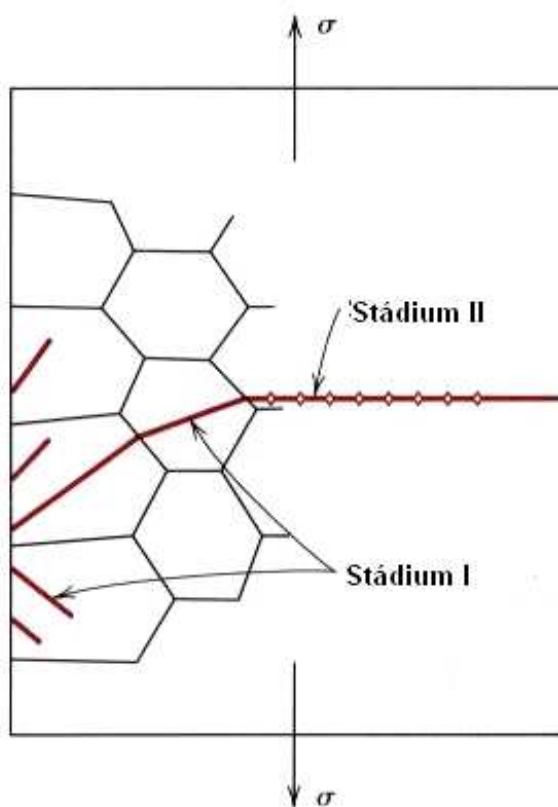
Třetí stádium únavy: začínají růst mikrotrhliny, z nichž většina se zastaví a dále se šíří pouze jedna magistralní trhlina, která se šíří většinou transkrystalicky (přes zrna) ve směru kolmém na normálové napětí až dojde k lomu. Toto stádium lze rozdělit na tři etapy: (a) šíření krátkých trhlin, (b) šíření dlouhých trhlin, (c) únavový lom. Krátké trhliny se šíří krystalograficky podél aktivních skluzových rovin v rovině maximálního skluzového napětí, tj. přibližně pod úhlem  $45^\circ$  ke směru působení cyklického tahového napětí (Obr.13.11). V této fázi se trhliny šíří transkrystalicky. Po dosažení jisté délky, která je závislá na materiálu, mají trhliny tendenci odklánět se z aktivních skluzových rovin a šířit se kolmo na směr hlavního napětí. V etapě (b) se šíří pouze jedna trhlina, většinou transkrystalicky kolmo na směr hlavního napětí.

Vlastní *únavový lom* je hladký, beze známek plastické deformace. Bývají na něm patrné linie šíření trhliny, odpovídající jednotlivým přetížením, nebo změnám provozních podmínek. Na jeho povrchu je patrné mikroskopické *žlábkování*, které jej odlišuje od jiných druhů lomu (Obr. 13.12 a 13.13).

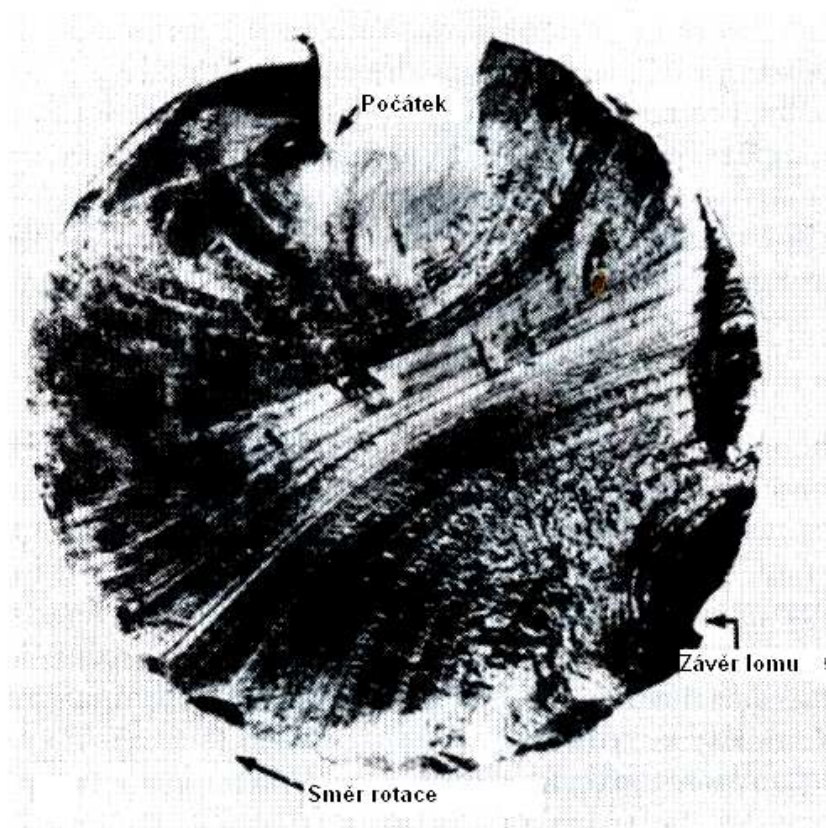




Obr.13.10. Schéma kartového skluzu (s extruzemi a intruzemi).



Obr.13.11. Etapy šíření trhliny.



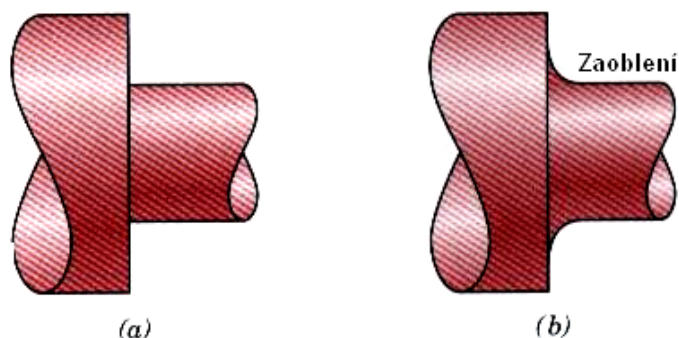
Obr.13.12. Únavový lom oceli, namáhané v torzi.



Obr.13.13. Mikrofotografie lomu hliníku (s charakteristickým žlábkováním).

### 13.2.2. Zlepšení únavových vlastností kovů.

Z předcházejícího výkladu plyne, že stav povrchu materiálu má značný vliv na odolnost proti únavě. Chceme-li tedy zvýšit mez únavy, musíme například nahradit ostré výstupky zaoblením (Obr.13.14). Rovněž technologické procesy, jako je povrchové kalení, nitridace, karbonizace, cementace a nitrocementace zvyšují tuto mez. Naopak povrchové vrstvy, vzniklé galvanizací (Ni, Fe – Ni, Zn, Cd) vedou k nasycení povrchu vodíkem, tím ke vzniku tahových napětíových pnutí na povrchu a snížení meze únavy. Tento negativní vliv lze zčásti zredukovat např. kuličkováním a válečkováním před galvanizací (tím vznikají tlaková povrchová pnutí).



Obr.13.14. Zvyšování odolnosti proti únavě.

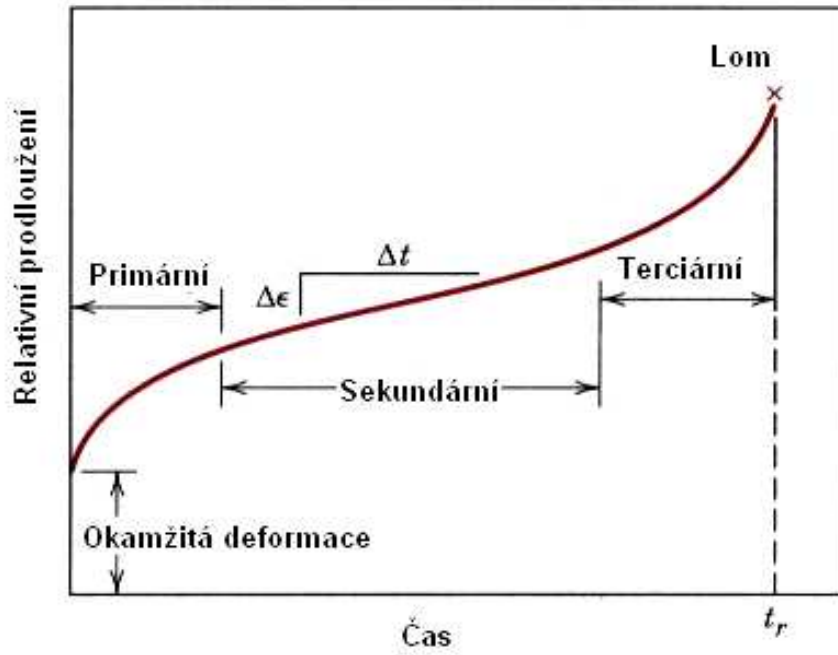
### 13.3. Creep (tečení) materiálu.

Uvažujeme – li, že deformace materiálu je závislá pouze na působícím napětí, předpokládáme mlčky, že deformační zpevnění je nezávislé na čase. To však není splněno, zejména při vyšších teplotách a souběžně s deformací probíhají v závislosti na čase tepelně aktivované *zotavovací procesy* (dynamické zotavení). Jimi se dosažený odpor proti deformaci zmenšuje, takže i při stálé hodnotě napětí se trvalá deformace materiálu s rostoucí dobou zatěžování zvětšuje. Potom mluvíme o tečení (creepu) materiálu.

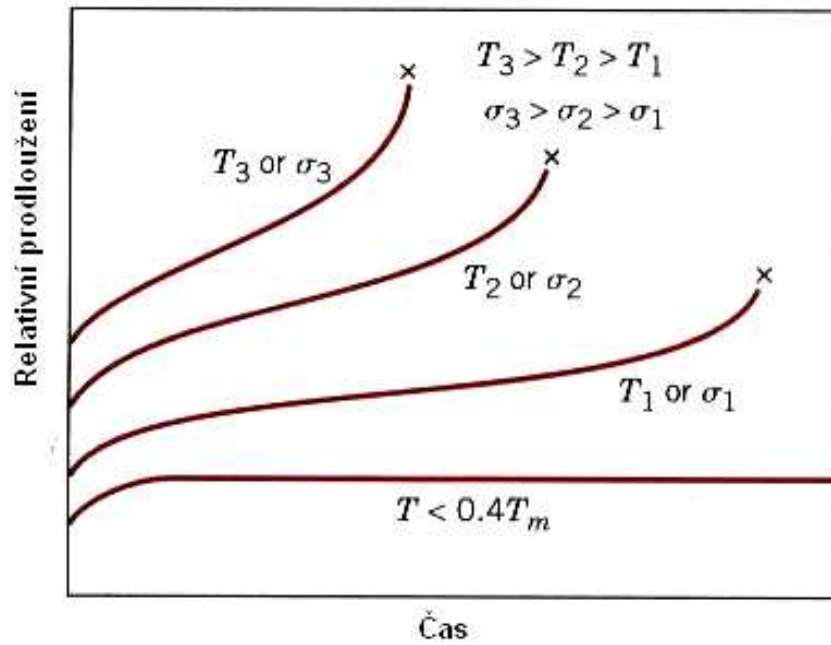
Přesná měření ukázala, že k tečení dochází za každé teploty. Za nízkých teplot (asi do  $0,3 T_M$ ) však deformace postupně v čase klesá a nekončí lomem (lze ji zanedbat). Při teplotách nad touto mezí může být deformace již značná a vede k lomu a musíme s ní tedy počítat.

Základní charakteristikou, popisující creepovou deformaci je závislost celkového relativního prodloužení  $\epsilon$  na čase při konstantním napětí a teplotě (Obr.13.15). Na této křivce lze rozlišit tyto oblasti: *okamžitá deformace*, *oblast primárního creepu*, charakterizovaná klesající rychlostí deformační rychlosti, *oblast sekundárního creepu*, kde je deformační rychlost přibližně konstantní a nakonec oblast *terciárního creepu*, kde deformační rychlost roste (ta je zakončena lomem).

Časový průběh creepu je výslednicí různých deformačních mechanismů, které se uplatňují v jednotlivých oblastech creepu v různé míře v závislosti na materiálu a jeho struktuře, na teplotě a napětí. Zejména se jedná o pohyb dislokací uvnitř zrn, poklusu po hranicích zrn a difúzi vakancí. Rychlost creepu je určována rychlostí tepelně aktivovaných dějů, které umožňují dislokacím, zachyceným na překážkách další pohyb a rychlost difúze vakancí. Proto je creepová deformace velmi citlivá na teplotu a velikost napětí (Obr.13.16).



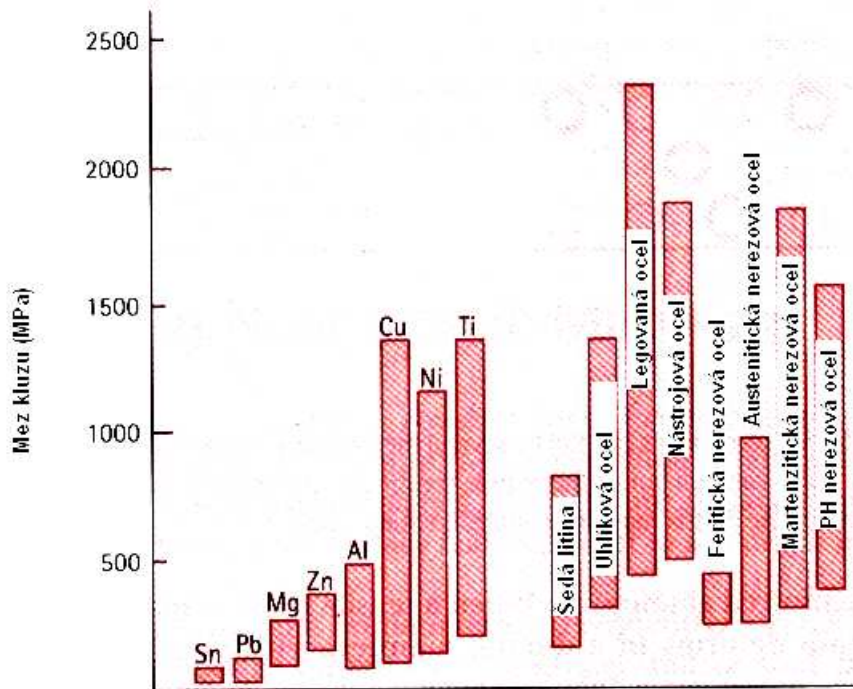
Obr.13.15. Typický tvar creepové křivky.



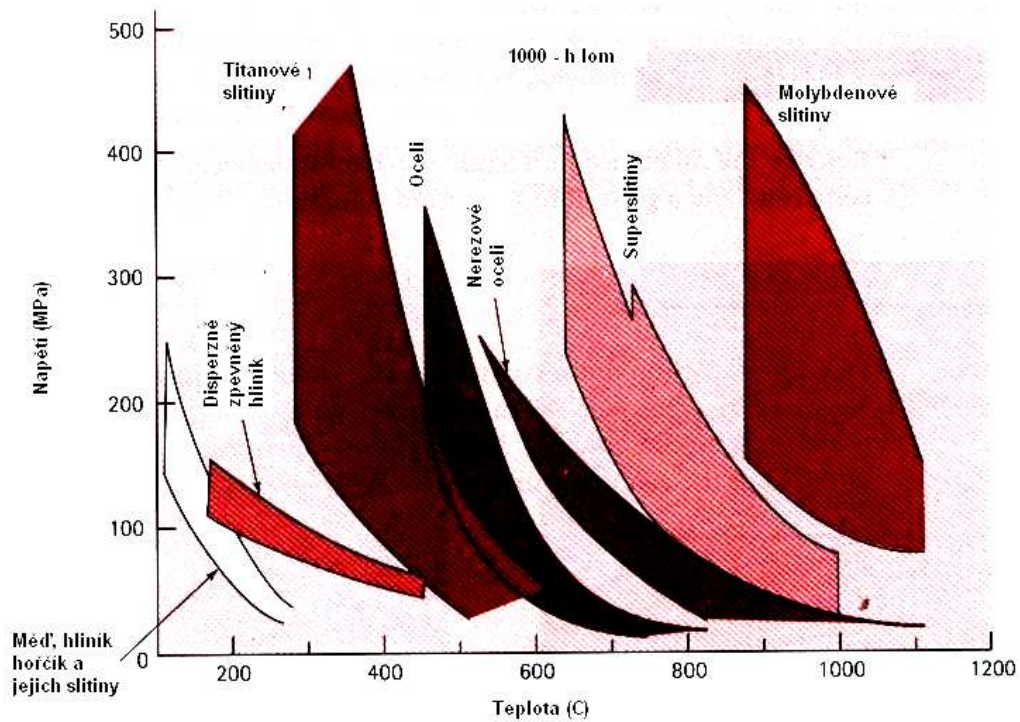
Obr.13.16. Vliv teploty a napětí na creepovou deformaci.



Na závěr uvedeme přehled oblastí využití kovů a slitin z hlediska jejich využití a odolnosti proti únavovému lomu (Obr.13.17 a 13.18)

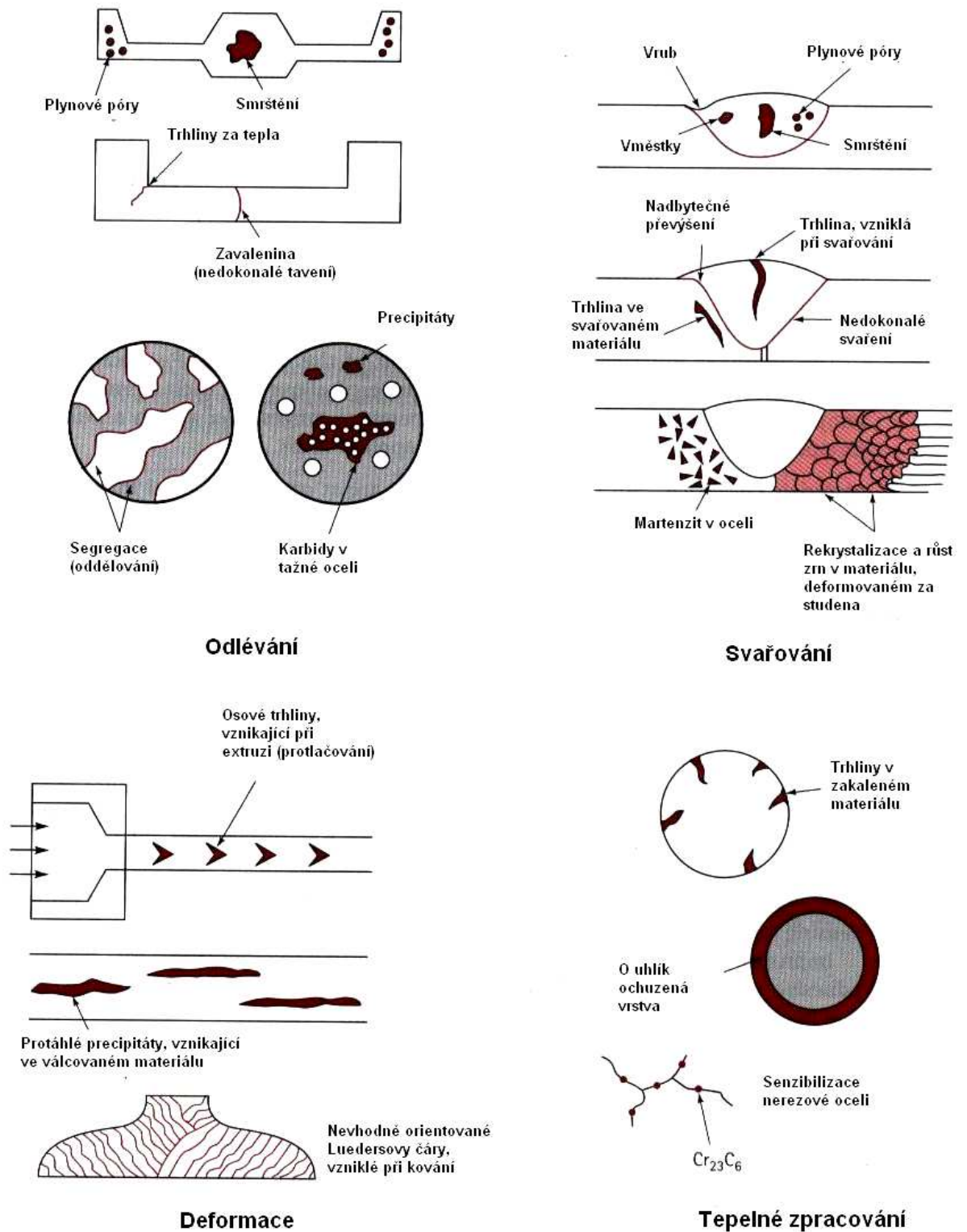


Obr.13.17. Srovnání vlastností kovů a slitin z hlediska jejich technického využití (srovnávaným parametrem je mez kluzu)



Obr.13.18. Oblast využití technických slitin z hlediska odolnosti proti únavě.

Na Obr.13.19. je uveden přehled vzniku různých poruch, zodpovědných za lom v kovových materiálech.



Obr.13.19. Přehled defektů, zodpovědných za lom v kovových materiálech



## 14. Železo a jeho slitiny. Neželezné kovy a jejich slitiny.

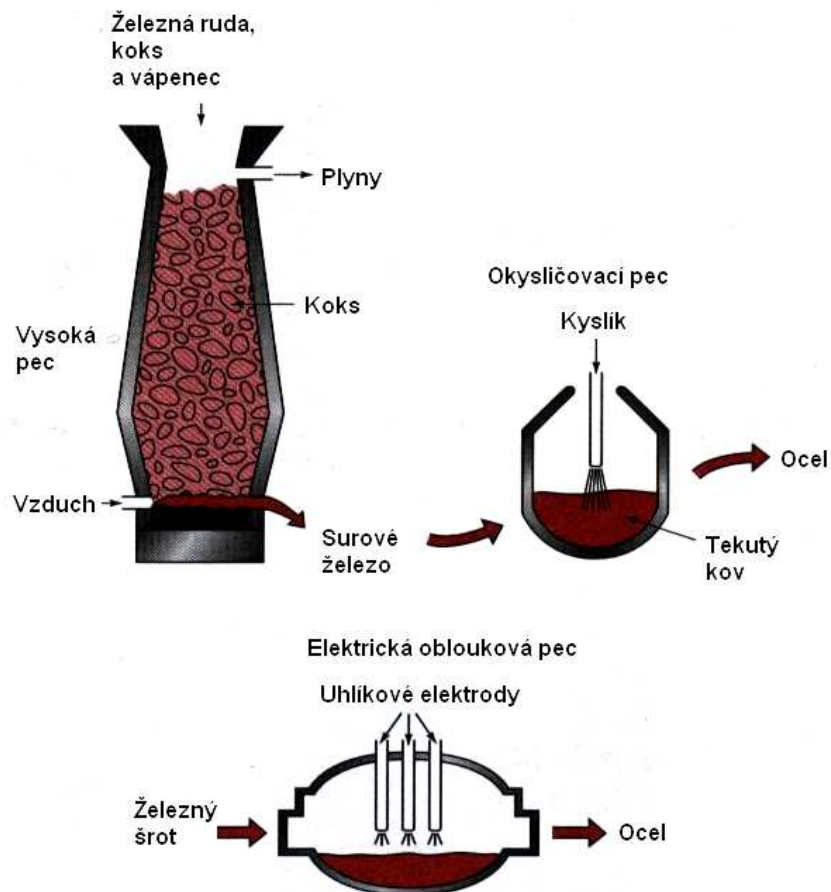
Slitiny železa se podílejí z cca 95% na celkové výrobě kovů, která činí ročně  $800 \cdot 10^6$  tun. Důvodem je skutečnost, že železo vytváří s různými příměsemi (C, B, Al, Si, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Ta a W) slitiny s nejrůznějšími fyzikálně – technickými vlastnostmi.

### 14.1. Slitiny Fe + C

Uhlík je v železe velmi málo rozpustný a slitiny Fe+C dělíme na:

- Slitiny s velmi nízkým obsahem uhlíku.
- Oceli s obsahem uhlíku až do 2 wt%.
- Surová železa a litiny, kde je obsah uhlíku větší, než 2wt%.

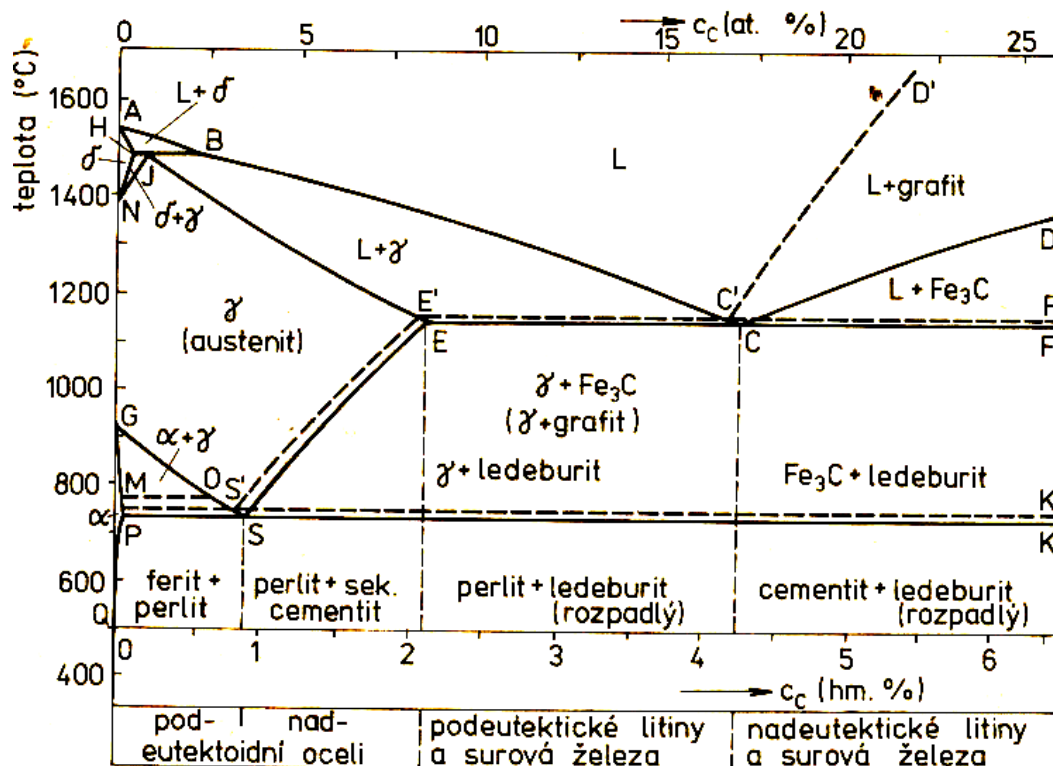
Způsob výroby ocelí a litin je námětem na celou další kapitolu a jejich názorné schéma je uvedeno na Obr.14.1.



Obr.14.1. Výroba oceli

Fázový diagram slitin Fe + C je uveden na obr 14.2. Z něho plyne, že čisté železo krystalizuje v modifikacích  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a  $\delta$ .  $\alpha$ -Fe se vyskytuje v intervalu teplot do 911 °C a nad 1392 °C (tu označujeme jako modifikaci  $\delta$  - obě krystalizují v soustavě b.c.c.). Modifikace  $\gamma$  krystalizuje v soustavě f.c.c. (mezi 911 °C a 1392 °C). Nad 760 °C (Curieův bod) ztrácí  $\alpha$ Fe své magnetické vlastnosti a značí se jako modifikace  $\beta$ .

Uhlík je v železe málo rozpustný a tvoří při malých koncentracích intersticiální tuhý roztok (v  $\alpha$ -Fe je prakticky nerozpustný, v  $\gamma$  - Fe je mez rozpustnosti až 2,11wt% C). Při vyšším obsahu uhlíku vzniká nová fáze, sloučenina  $\text{Fe}_3\text{C}$ , tj. karbid železa (cementit). Cementit má bod tání 1380 °C a krystalizuje v ortorobické soustavě. Je velmi tvrdý a křehký (tvrdost je 700 – 800 HV).



Obr.14.2. Fázový diagram soustavy Fe+C

Atomy uhlíku mohou být nahrazeny jinými vhodnými prvky o malém atomovém poloměru (N,H,B), podobně některé atomy železa mohou být nahrazeny např. Mn, Cr.

Cementit není stabilní fází a ohřevem nad asi 400 °C se rozpadá na Fe a C (grafit). Tento rozpad se nazývá *grafitizací*. Na Obr.14.2 je cementit vyznačen zároveň jinými fázemi (austenit, ledeburit, ferit).

Rovnovážný diagram železo – karbid železa umožňuje rozdělit technické slitiny železa s uhlíkem do dvou hlavních skupin:

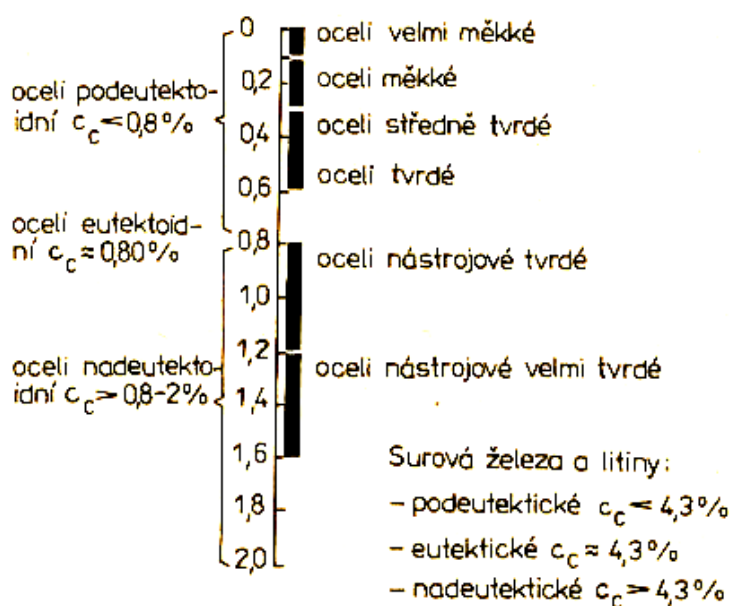
1. Slitiny s obsahem uhlíku asi do 2% - *oceli* a to:
  - a) Eutektoidní oceli s obsahem uhlíku do 0,8%.
  - b) Eutektoidní oceli s obsahem uhlíku 0,8%.
  - c) Nadeutektoidní oceli s obsahem uhlíku od 0,8% do 2%.

2. Slitiny s obsahem uhlíku nad cca 2% - *surová železa a litiny*.
  - a) Podeutektické slitiny s obsahem uhlíku 2 – 4,3%.
  - b) Eutektické slitiny s obsahem uhlíku 4,3%.
  - c) Nadeutektické slitiny s obsahem uhlíku nad 4,3%.

Rovnovážnými strukturními složkami jsou:

1. Ferit – tuhý roztok uhlíku v  $\alpha\text{Fe}$ , nebo v  $\delta\text{Fe}$ , obsahuje až 0,1% uhlíku.
2. Austenit – tuhý roztok uhlíku v  $\gamma\text{Fe}$ . Může obsahovat až 2,11% uhlíku.
3. Cementit – karbid železa  $\text{Fe}_3\text{C}$  v různých modifikacích:
  - cementit primární, tj. hrubé deskovité krystaly,
  - cementit eutektický, tj. jemnější krystalky, než cementit primární,
  - cementit sekundární, segregační. Vylučuje se na hranicích zrn austenitu při poklesu teploty,
  - cementit terciární, vylučuje se na hranicích zrn feritu.
4. Grafit – čistý krystalický uhlík v různých modifikacích:
  - grafit primární – hrubé lupínky, krystalizující přímo z taveniny,
  - grafit eutektický – jemnější lupínky,
  - grafit sekundární – drobná zrna či lupínky, uložené na primárním či eutektickém grafitu,
  - grafit eutektoidní – součást grafitového eutektoidu, obvykle jemnozrnný, nebo lupínkový,
  - grafit terciární – vzniká segregací z feritu  $\alpha$  při velmi pomalém ochlazení pod eutektoidní teplotu.
5. Ledeburit – eutektikum, složené ze směsi krystalků austenitu a cementitu.
6. Grafitové eutektikum – směs austenitu a lupínkového grafitu, současně krystalizující z taveniny při eutektické teplotě.
7. Perlit – eutektoid, složený z feritu  $\alpha$  a grafitových zrn, nebo jejich lupínků.

Obsah uhlíku má, jak již bylo několikrát zmíněno, značný vliv zejména na mechanické vlastnosti slitin železa (oceli a litiny). Přehled je uveden v Tab.14.1.



Tab.14.1. Slitiny železa

## 14.2. Vliv dalších prvků.

V ocelích jsou přítomny prvky *doprovodné* a prvky *legovací* (přísady, příměsi). Doprovodné prvky lze rozdělit na škodlivé (nečistoty), zhoršující vlastnosti slitin železa a prospěšné, užívané k vázání, nebo odstraňování nečistot:

Doprovodné prvky: škodlivé: P, S, N, O, H

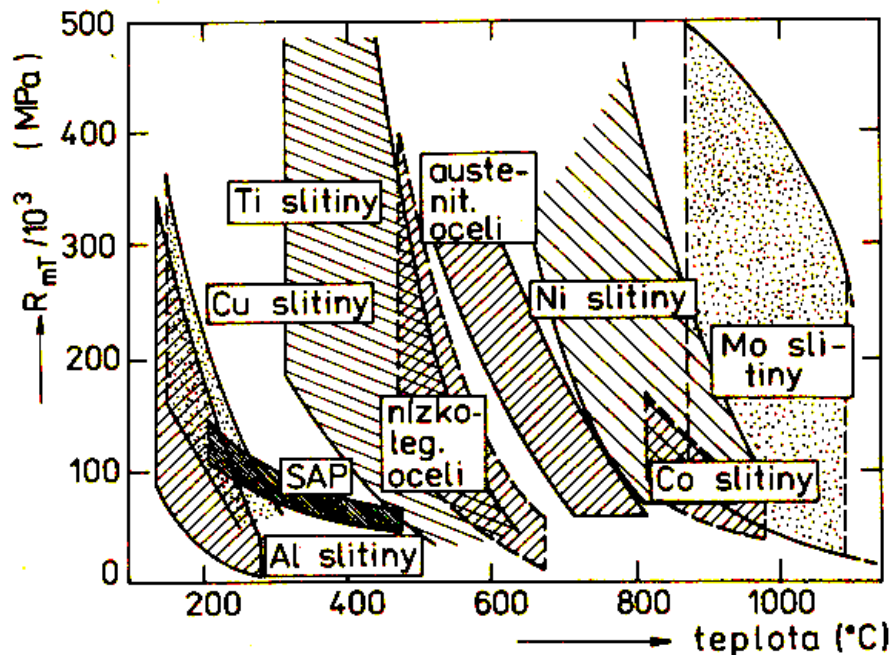
prospěšné: Mn, Si, Al, P, S, Cu.

Legovací prvky: Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Al, Ti, Nb, Co, Cu.

Vliv legovacích prvků:

- Zvýšení tvrdosti: (Mn, Si, Ni, Mo, V, W, Cr)
- Zlepšení elektrických a magnetických vlastností: (Si).
- Snížení opotřebení: (W, Cr, V, Mo).
- Zvýšení žárupevnosti: (Cr, Mo, V, W).
- Zvýšení odolnosti proti oxidaci za vysokých teplot (Cr, Si, Al) – vytvoří odolnou vrstvičku na povrchu součástky.
- Zvýšení odolnosti proti korozi: (Cr, Ni, Mo, Si, Cu)

Na Obr.14.3. je uveden přehled žárupevných ocelí z hlediska jejich použití.



Obr.14.3. .

Důležitou roli při modifikování vlastností ocelí a dalších slitin železa hraje též tepelné zpracování a to tzv. martenzitická a bainitická přeměna. Vysvětlení těchto přeměn však přesahuje rámec našeho přehledu a případné zájemce odkazujeme na podrobnější literaturu, uvedenou v závěru práce.

### **14.3. Neželezné kovy.**

Význam neželezných kovů je dán především jejich specifickými vlastnostmi. Jako příklad uvedeme pouze nejdůležitější z nich:

Olovo – jeden z nejměkčích technických kovů. Je odolné proti působení kyselin, zejména kyseliny sírové. Využívá se v chemickém průmyslu, ochraně podmořských kabelů, k výrobě akumulátorů. Velká atomová hmotnost olova ho předurčuje k využití při ochraně proti rentgenovému záření a proti gama záření (průmysl, lékařství). Slitina Pb+Sn+Sb (broky, kulky), Pb+Sn, eutektická (pájka). Další využití: kompozice (ložiska) a liteřina (tisk).

Zinek – odolný proti atmosférickým vlivům (pozinkování). Záporná elektroda v monočláncích. Slitiny – výroba karburátorů, mosaz.

Hořčík – má nejnižší hustotu ze všech technických kovů, špatně se tváří, má nízkou vrubovou houževnatost (součástky musí být dobře vyleštěny). Slitiny s hliníkem se používají v letectví a dopravě. Perspektivní použití: kontejnery na uchovávání tekutého vodíku (vodíkové hospodářství).

Hliník – nízká hustota, dobrá elektrická vodivost a kujnost, je korozivzdorný (na povrchu vzniká ihned tenká vrstvička  $Al_2O_3$ ). V elektrotechnice – vodiče, kondenzátory. V chemickém průmyslu (trubice). Má vysokou tepelnou vodivost (výroba radiátorů). Obalový průmysl (alobal), kombinace s plasty – kompozity.

Měď – má vysokou elektrickou vodivost (využití v elektrotechnice – vodiče, kabely). Vysoká tepelná vodivost (ohřívače, výměníky tepla). Využití na pokrývání střech, okapy apod. Významné slitiny: mosaz, bronz.

Nikl – legující přísada do oceli. Je korozivzdorný – poniklování jiných kovů, chemický a potravinářský průmysl.

Titan – viz kapitola 12.

### **14.4. Slitiny neželezných kovů.**

Slitiny mědi. Měď tvoří tvoří zpravidla substituční tuhé roztoky. Se zinkem tvoří mosazi, s cínem, hliníkem a beryliem bronzy. Slitina Cu-Pb je zvláštní v tom, že jak v tekuté, tak i v pevné fázi je Pb v Cu nerozpustné, takže tvoří směs krystalků mědi a olova. Takový materiál se snadněji obrábí (olovo se přidává i do slitin mědi z tohoto důvodu). Stručný souhrn druhů a vlastností mosazí resp. bronzů je uveden v Tab.14.2, resp.14.3.

Slitiny hliníku. Pokud nepřekročí celkový obsah legujících prvků 10wt%, tvoří s hliníkem substituční tuhý roztok (legující prvky se do hliníku přidávají kvůli vytvrzování). Nejběžnějšími vytvrzovanými slitinami hliníku jsou slitiny Al-Cu-Mg, zvané „dural“ s výhodnými mechanickými vlastnostmi, jejichž důvodem je tzv. stárnutí. Slitiny Al-Mg-Si nejsou sice tak pevné, jako dural, ale mají na rozdíl od nich dobrou odolnost proti korozi a výbornou schopnost povrchových úprav. Přehled technicky využívaných slitin na bázi hliníku je uveden v Tab. 14.4.

Poznámka: Slitiny pro kluzná uložení (kompozice):

Nároky na slitiny pro kluzná uložení jsou poměrně vysoké. Taková slitina musí být odolná proti korozi, zadírání a proti tečení za vyšších teplot. Musí mít malou tepelnou roztažnost, dobrou obrobitelnost a nízký modul pružnosti. Tyto požadavky nemůže splnit žádný homogenní materiál, ale musí to být kompozit, u něhož se v měkké matici nacházejí tvrdé částice (tvrdá fáze). Je to např. slitina SnSbCuNiCd, nebo PbSnCuSb.

Pájky: pájka musí splňovat požadavky snášivosti, vzlínavosti a zabíravosti. Pájky dělíme na *měkké* – pod 500 °C (eutektická slitina PbSn) a *tvrdé* – mosazné (pájení oceli, niklu a slitin Cu), stříbrné (pájení slitin mědi, oceli, titanu a jeho slitin) a hliníkové (pájení hliníku – např. slitina AlSi).



Tab.14.2. Přehled různých druhů mosazí.

Slitina	Vlastnosti	Použití
CuZn4 CuZn10 CuZn15 CuZn20	Dobrá tvárnost za studena Schopnost povrch. Úprav Odolnost proti korozi	Manometry, Trubice, Dráty pro síta, Bižuterie.
CuZn30 CuZn33	Schopnost hlubokého tahu a zpracování za studena	Nábojnice, Hudební nástroje, Chladiče
CuZn37 CuZn37Pb	Schopnost zpracování za Studena, leštitelnost.	Široké použití, dá se obrábět.
CuZn40 CuZn42	Dobrá zpracovatelnost za tepla, dobrá obrobiteľnosť.	Výkovky
CuZn30 CuZn23AlAs	Odolnost proti korozi	Trubky pro kondenzátory
CuZn24Ni14 CuZn20Ni18	Odolnost proti korozi, schopnost povrchových úprav, pružná.	Pružiny, strojírenská zařízení.

Tab.14.3. Přehled různých druhů bronzů.

Slitina	Vlastnosti	Použití
CuSn1 CuSn3 CuSn6 CuSn8	Dobré třecí vlastnosti, dobrá tvárnost za studena.	Ložisková pouzdra, pružiny, dráty pro síta.
CuAl5 CuAl10Fe4Ni4	Odolnost proti korozi, dobrá tvárnost za tepla, nejiskřící.	Výkovky, armatury, nejiskřící nástroje.
CuNi20 CuNi30	Odolnost proti korozi, dobrá pevnost za vyšších teplot.	Jakostní kondenzátorové trubky.
CuNi45	Velký elektrický odpor	Odporové, dráty, termočlánky
CuBe	Velká mez kluzu, pružná	Pružiny, elektrody odporových svářeček.
CuCd	Dobrá elektrická vodivost i pevnost.	Lamely točivých strojů
CuCr CuCrZr	Dobrá elektrická vodivost i pevnost (i za vyšších teplot)	Kotouče a elektrody odporových svářeček

Slitina	Vlastnosti	Použití
AlMn1	Odolnost proti korozi	Chemie, letectví
AlMg3 AlMg5 AlMg7 AlMg4,5Mn1	Odolnost proti korozi i mořské vodě, leštitelnost, dobré mechanické vlastnosti.	Potravinářství, chemie, stavba lodí.
AlMgSi0,5 AlMgSi1	Snadná zpracovatelnost, schopnost povrchových úprav, dobrá el. vodivost.	Stavebnictví, elektrotechnika.
AlCu4Mg AlCu4Mg1	Dobré únavové vlastnosti, nebezpečí koroze, obtížně se svařuje.	Běžná slitina pro strojírenství a letectví.
AlCuMgPb	Dobře se obrábí	Běžná ve strojírenství
AlCu2Ni	Dobré mechanické vlastnosti i za vysokých teplot.	Výkovky, písty, ojnice.
AlZn6MgCu AlZn5Mg2	Velmi dobré mechanické vlastnosti i ve svarech, nebezpečí koroze.	Letectví, stavebnictví doprava, běžné konstrukce.

Slitina	Tvrdość (HB)	Použití
AlSi13Mn	50 - 65	Složité korozivzdorné odlitky.
AlSi10MgMn	50 - 100	Značně namáhané korozivzdorné odlitky
AlSi10Mn	150 - 190	Méně náročné odlitky, Dobrá obrobiteľnosť, Malá korozivzdornost
AlSi7Mg	50 - 80	Korozně odolné namáhané součástky
AlSi5Cu4Zn	60 - 75	Méně náročné odlitky, Malá korozivzdornost.
AlSi8Cu2Mn	80 - 90	Odlitky pro motorová vozidla.
AlSi10Cu1MnMg	50 - 80	Složité odlitky, malá korozivzdornost.
AlSi12CuMgNi	100 - 130	Písty motorových vozidel
AlSi20Cu2MnNiMg	80 - 110	Vysocenamáhané písty motorových vozidel.
AlCu4NiMg	80 - 110	Odlitky, namáhané za tepla, Hlavy válců.
AlMg5Si1Mn	55 - 80	Odlitky namáhané za tepla, dobře leštitelné, korozivzdorné
AlMg10	60 - 80	Vysoce korozivzdorné odlitky, Nádobí.

## **16. Záření, jeho druhy a využití.**

### **Úvod.**

Člověk jako biologický druh od samého počátku své existence žije v neustálé interakci se zářením různého druhu. Některé záření můžeme detekovat svými smysly (např. světlo, teplo) a jiné více nebo méně složitými přístroji (fotoaparát, spektroskop, radiopřijímač, Wilsonova mlžná komora, atd.). Proto je přirozené, že nás napadne otázka, týkající se škodlivosti nebo prospěšnosti záření pro naše zdraví. Cílem příspěvku je pokus o stručnou, kvalitativní odpověď na tuto otázku.

### **16.1 Druhy záření.**

Pojem záření lze definovat jako *šíření energie prostorem, které je možné i bez přítomnosti hmotného prostředí*. Jako nejpřirozenější se jeví rozdělení záření na *vlnové* a *částicové*. Ovšem již studenti na střední škole ví, že každé záření má *dualistický* charakter, tj. projevuje se zároveň jako vlna i jako částice (má vlnový i korpuskulární charakter). Dělení podle toho, zda částice nesou či nenesou elektrický náboj by bylo ještě méně přesné, stejně jako dělení podle místa vzniku (jádro, nebo elektronový obal atomu). Proto pouze pro potřeby této publikace rozdělíme záření na záření *elektromagnetické* a záření ostatní (které nazveme *částicové, korpuskulární*).

#### **16.1.1 Elektromagnetické záření,**

V celém prostoru kolem nás i v celém Vesmíru se vyskytuje elektromagnetické záření, které má obrovský rozsah vlnových délek  $\lambda$  od řádu velikosti atomů ( $10^{-10}$  m) až po hodnoty řádu  $10^5$  m. Poznamenejme, že mezi vlnovou délkou záření  $\lambda$ , frekvencí  $f$  a rychlostí šíření elektromagnetických vln  $c$  ( $\sim 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>) platí známý vztah

$$c = \lambda f \tag{1}$$

Na Obr.16.1 je znázorněno tzv. spektrum elektromagnetického záření, tj. jsou zde vyneseny a pojmenovány jednotlivé části spektra v závislosti na frekvenci záření (nebo na jeho vlnové délce). Z obrázku vidíme, jak úzký je interval oblasti viditelného světla ve srovnání s celým dalším spektrem. Oblast viditelného světla byla (a stále ještě je) zkoumána celými generacemi fyziků, chemiků, inženýrů, lékařů, biologů, atd., takže o ní bylo nashromážděno velké množství poznatků (optika).

#### **16.1.2 Záření korpuskulární.**

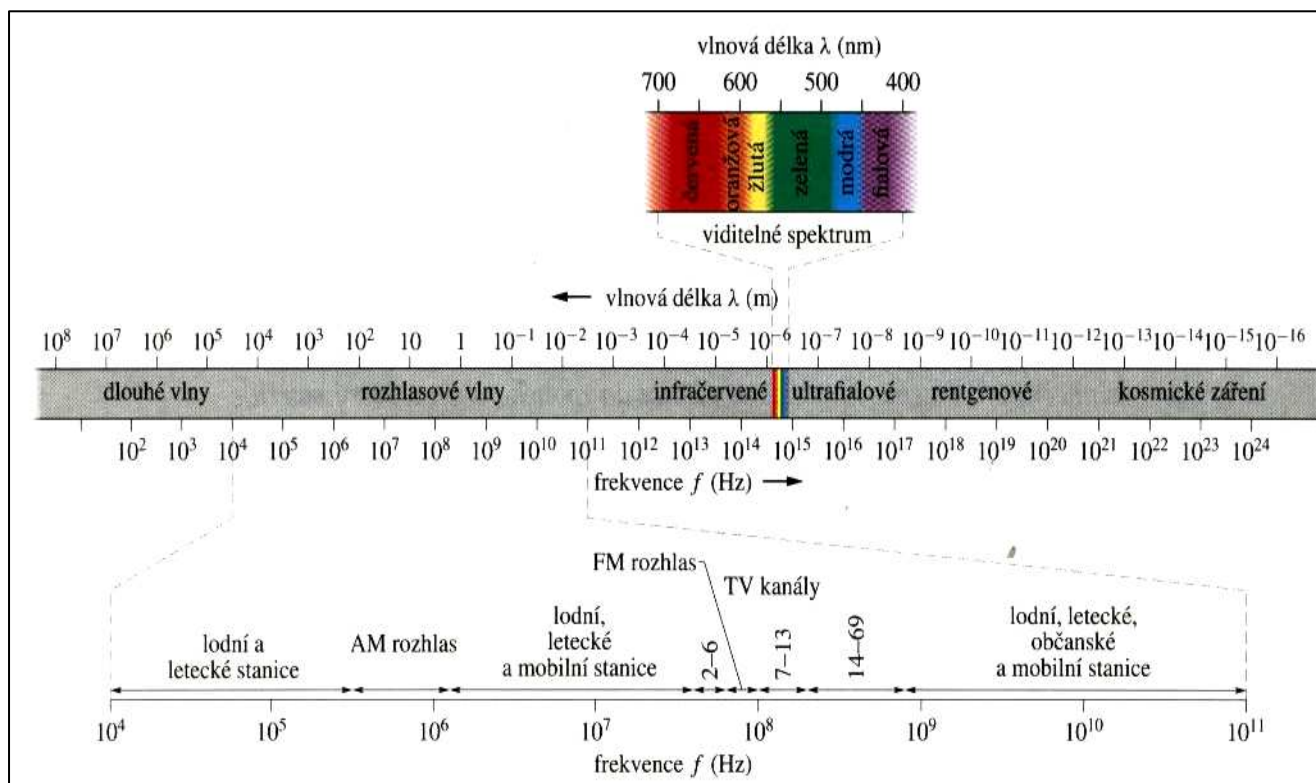
Koncem 19. století došlo k několika významným objevům, které mají úzký vztah k pojmu záření:

V roce 1895 objevil W.C. Röntgen tzv. paprsky X (nyní na jeho počest nazvané rentgenovými paprsky).

V roce 1896 objevil H. Becquerell přirozenou radioaktivitu uranové rudy.

V roce 1897 rozlišil E. Rutherford radioaktivní záření na paprsky  $\alpha$  a  $\beta$ . V témže roce objevil J.J. Thomson elektrony a zjistil, že jsou částí atomu.

V roce 1898 objevila M. Curieová – Sklodovská a její manžel Pierre Curie radioaktivní prvky polonium a radium.



Obr. 16.1. Elektromagnetické spektrum

Uvedené práce (a samozřejmě i mnohé další) iniciovaly bouřlivý rozvoj jaderné fyziky, jejíž součástí je i nauka o ionizujícím ( podle našeho dělení korpuskulárním) záření.

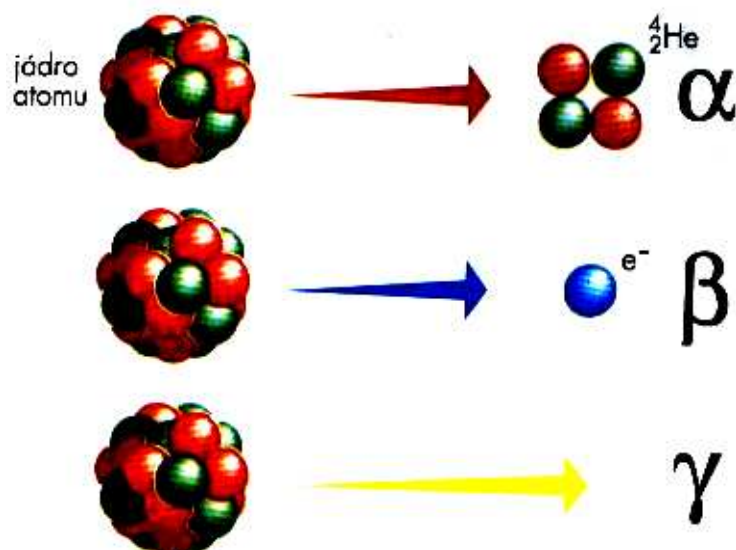
Základními druhy ionizujícího záření je záření  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a neutrony (Obr.16.2.).

**Záření alfa** je tvořeno jádry helia a je vyzařováno jádry takových prvků, jako je např. uran, thorium, radium, atd. Ochranou proti záření alfa může být například papír, nebo látka oděvu. Pokud se však prvky, vyzařující záření alfa dostanou např. do plic, mohou poškodit jejich citlivou sliznici, neboť mají poměrně velkou hmotnost a tedy i kinetickou energii. Poškození sliznice může mít za následek zhoubné bujení tkáně (o tomto problému se zmíníme později).

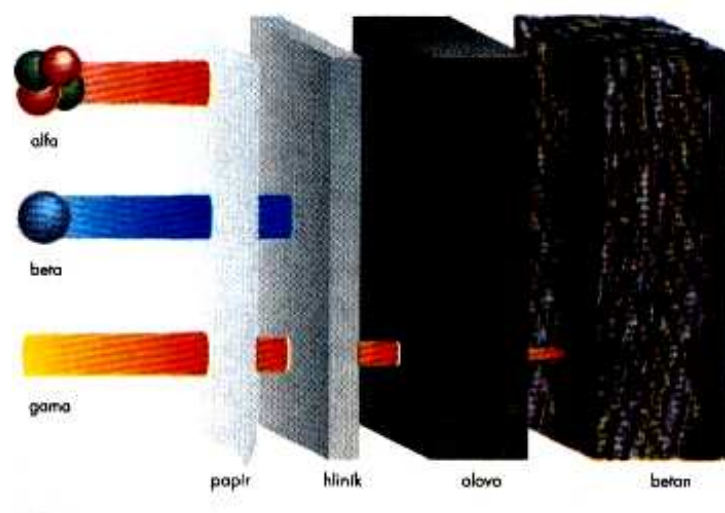
**Záření beta** je tvořeno elektrony, nebo pozitrony a rovněž vzniká při rozpadu jader některých radioaktivních prvků. Je pronikavější, než záření alfa, může být pohlceno např. 1 – 2 cm tlustou vrstvou vody, nebo hliníku.

**Záření gama** je elektromagnetické záření, jeho částicemi jsou fotony. Vzniká rovněž při radioaktivních přeměnách. Je ještě pronikavější, než záření beta, nejlépe se dá pohlit ve vrstvě olova (Obr.16.3).

**Neutrony** jsou neutrální elementární částice, vznikající např. při štěpení jader uranu. Protože jsou elektricky neutrální, mají vysokou pronikavost. Nejlépe je lze pohlit ve vrstvě vody, nebo parafinu (zpomalují se srážkami s jádry vodíku)



Obr.16.2. Záření alfa, beta a gama.



Obr.16.3. Pronikavost jednotlivých typů ionizujícího záření.

## 16.2. Důležité pojmy a jednotky.

Atomová a jaderná fyzika tvoří velmi rozsáhlou oblast fyziky s vlastním názvoslovím. Proto objasníme stručně některé základní pojmy, potřebné v dalším výkladu:

**Jádro atomu** je velmi malá centrální část atomu o rozměrech řádu  $10^{-15}$  m (rozměr celého atomu je řádu  $10^{-10}$  m). Jádro je tvořeno *protony* a *neutrony* (společný název *nukleony*) a je vázáno dohromady silnými jadernými silami.

**Radioaktivita** je vlastnost některých atomů samovolně se rozpadat na atomy jednodušší. Produktem rozpadu je elektromagnetické záření a částice. Příčinou rozpadu je nestabilita jader, způsobená nadbytkem protonů nebo neutronů v jádře, nebo tím, že jádra jsou příliš těžká, složitá a tím nestabilní.

**Radionuklid** je nuklid, jehož atomy podléhají radioaktivní přeměně za současné emise ionizujícího záření.



**Poločas přeměny**  $T_{1/2}$  představuje dobu, ze kterou se samovolně přemění polovina z počátečního počtu atomů radionuklidu v daném souboru (Obr.16.4).

**Přeměnová konstanta** udává poměr počtu atomů, přeměněných za sekundu k celkovému počtu atomů radionuklidu v daném vzorku. Jednotkou je  $s^{-1}$ .

**Aktivita** udává pravděpodobný počet atomů radionuklidu v zářiči, u nichž během jedné sekundy nastane samovolná radioaktivní přeměna. Je tedy definována vztahem

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (2)$$

kde  $dN$  je střední počet atomů, přeměněných v časovém intervalu  $dt$ . Jednotkou aktivity je *becquerel* ( $Bq$ , rozměr  $s^{-1}$ ), který představuje jeden rozpad za sekundu. *Plošná aktivita* je potom definována jako podíl aktivity plošně rozložené homogenní látky a její plochy  $S$ . Měříme ji v  $Bq.m^{-2}$ . *Měrná aktivita* je podíl aktivity látky a její hmotnosti. Jednotkou je  $Bq.kg^{-1}$ . *Objemová aktivita* je podíl aktivity určitého množství radioaktivní látky a jejího objemu. Měříme ji v  $Bq.m^{-3}$ .

**Dávka (absorbovaná)** je mírou ozáření látky. Je definována jako podíl energie  $dW$ , předané ionizujícím zářením objemovému elementu o hmotnosti  $dm$ :

$$D = \frac{dW}{dm} \quad (3)$$

Jednotkou dávky je *gray* ( $Gy$ , rozměr  $J.kg^{-1}$ ).

**Dávkový příkon** vyjadřuje rychlost růstu absorbované dávky. Je určen vztahem

$$D^+ = \frac{dD}{dt} \quad (4)$$

kde  $dD$  je přírůstek dávky za dobu  $dt$ . Jednotkou je  $Gy.s^{-1}$

**Dávkový ekvivalent** je mírou biologické škodlivosti různých druhů ionizujícího záření na lidský organismus. Je to součin dávky  $D$ , bezrozměrného jakostního faktoru  $Q$  a případně i dalších bezrozměrných modifikujících faktorů  $N$ , takže

$$H = D.Q.N \quad (5)$$

Jednotkou dávkového ekvivalentu je *sievert* ( $Sv$ ).

**Příkon dávkového ekvivalentu** vyjadřuje rychlost růstu dávkového ekvivalentu a je dán vztahem

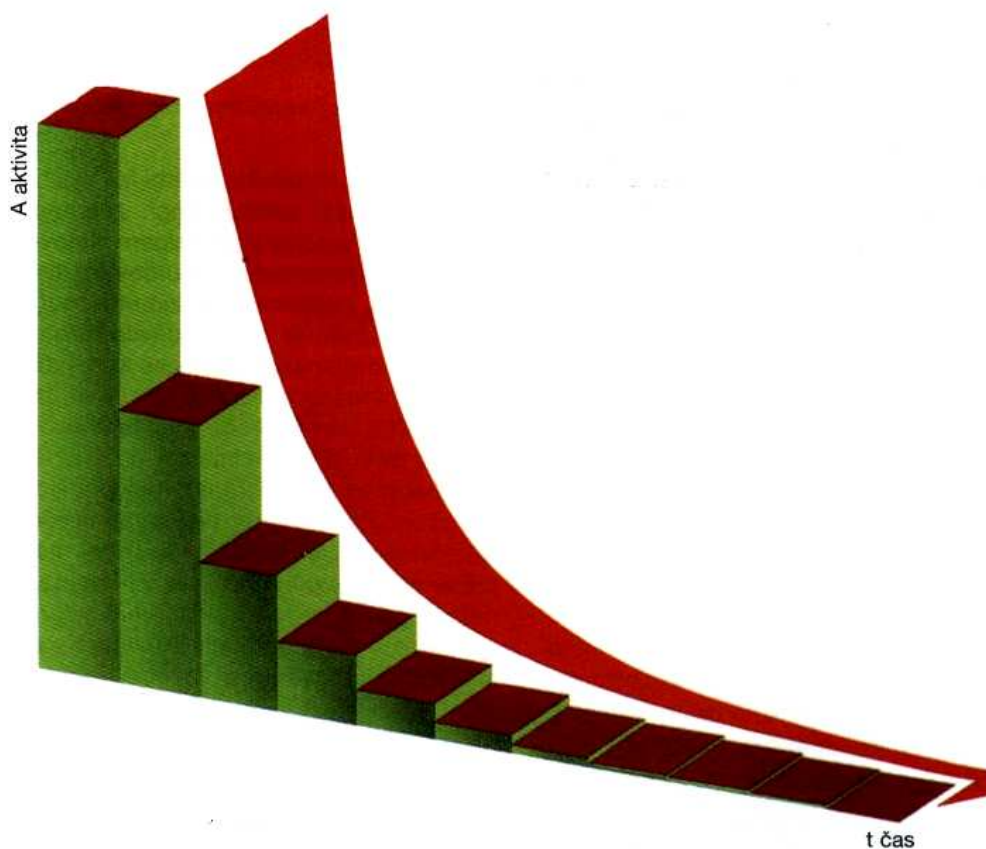
$$H^+ = \frac{dH}{dt} \quad (6)$$

kde  $dH$  je přírůstek dávkového ekvivalentu za dobu  $dt$ . Jednotkou je  $Sv.s^{-1}$

**Efektivní dávkový ekvivalent** je vážený průměr středních hodnot dávkového ekvivalentu  $H_T$  v tkáních a orgánech lidského těla, přičemž váhové faktory  $w_T$  jsou stanoveny normou:

$$H_E = \Sigma(w_T.H_T) \quad (7)$$

Jednotkou efektivního dávkového ekvivalentu je *sievert*.

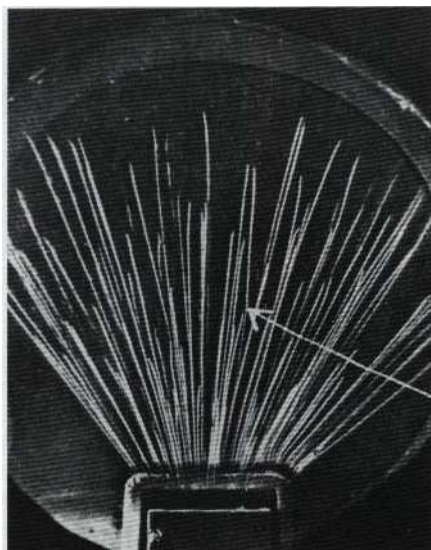


Obr.16.4. K objasnění pojmu „Poločas přeměny“

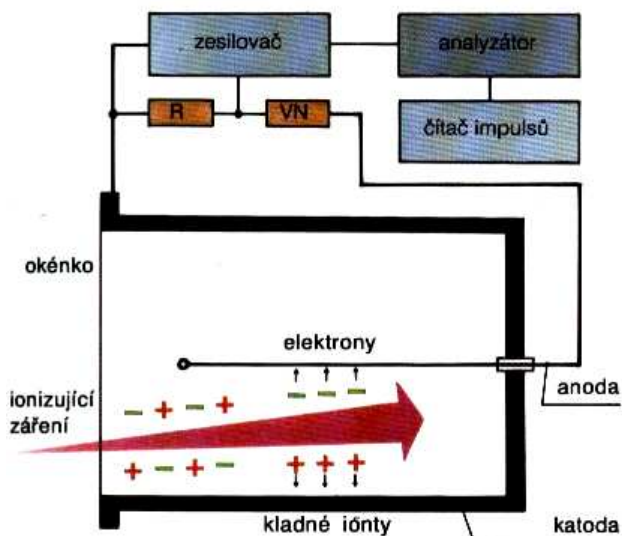
### **16.3 Měření radioaktivního záření.**

Radioaktivní záření je lidskými smysly nepostižitelné a proto k jeho měření musíme využívat přístrojů, založených na různých účincích ionizujícího záření. Tak například můžeme měřit elektrický náboj iontů, vzniklých průchodem záření látkou. Protože množství vytvořeného náboje je zpravidla malé, je třeba ho různými metodami zesílit. Postupně uvedeme ty nejpoužívanější z nich:

**Wilsonova mlžná komora.** Ionizující záření vytvoří na své cestě srážkami s atomy vzduchu řadu iontů, které se stanou tzv. *kondenzačními centry*, na nichž se vytvoří velmi malé kapičky vodní páry (obdoba stopy za tryskovým letadlem). Musíme proto experiment zařídit tak, aby právě v okamžiku, kdy chceme měřit, došlo k přesycení vodní páry v komoře (např. adiabatickým ochlazením). Pomocí vnějšího magnetického pole, které zakříví dráhu nabitě částice lze určit náboje i hmotnosti pohybujících se částic (a zjistit, které z nich jsou neutrální). Výsledkem je pak zpravidla fotografie jejich drah. (Obr.16.5.). Podobný je i princip **bublínkové komory** s kapalným vodíkem jako náplní (podél dráhy částice vznikají drobné kapičky plynného vodíku), nebo **silná vrstva fotografické emulze**.



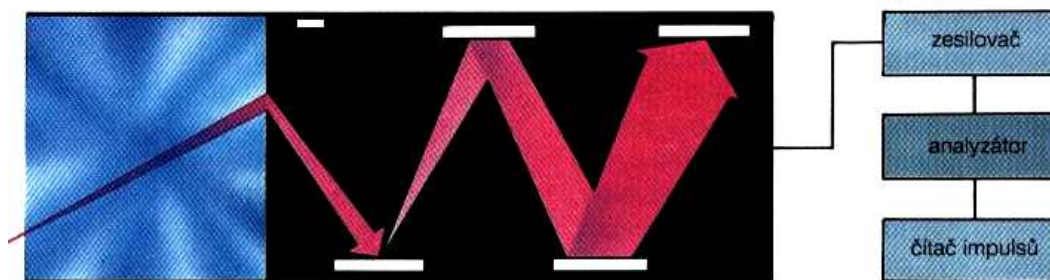
Obr.16.5. Wilsonova mlžná komora



Obr.16.6. Princip Geigerova – Müllerova Počítače (částice alfa)

**Plynové detektory** jsou rovněž založeny na principu ionizace a excitace atomů plynu. Plyn je uzavřený v kovovém obalu s elektrodou uprostřed a mezi tuto elektrodu a kovový obal je vloženo napětí. Jakmile do detektoru vnikne záření, způsobí ionizaci, která se projeví jako ionizační proud mezi elektrodou a obalem. Podle závislosti proudu na napětí se rozlišují různé typy detektorů (ionizační komora, proporcionální počítač, Geigerův – Mülleroův počítač (Obr.16.6)).

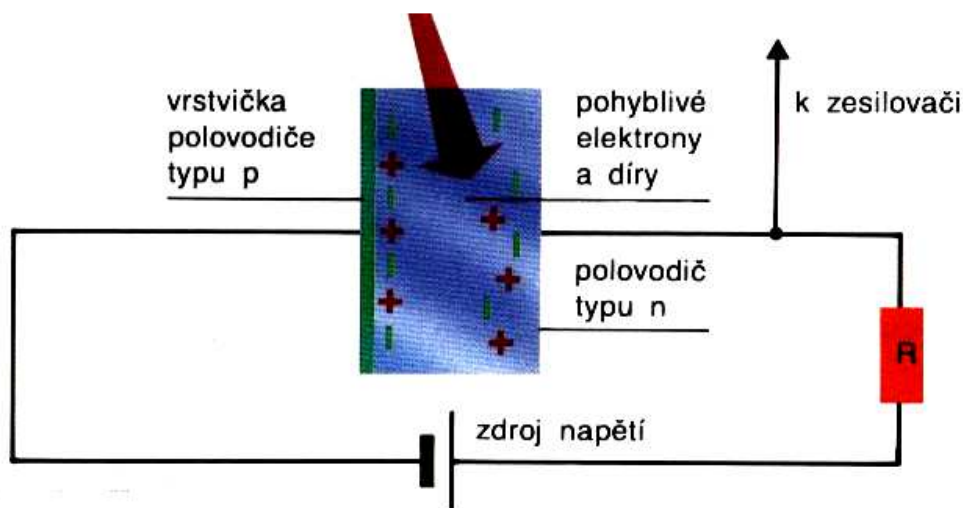
**Termoluminiscenční dozimetr.** Termoluminiscenční látka má tu vlastnost, že záření v ní vybudí elektrony do vyššího energetického stavu. Když se pak ozářená látka zahřeje (asi na 200 °C), elektrony se vracejí do základního stavu a přebytek své energie vyzáří ve formě světelných záblesků. Ty se pomocí fotonásobiče (Obr.16.7) převádějí na napěťové impulzy a měří.



Obr.16.7. Princip fotonásobiče.

**Scintilační detektory** jsou založeny na podobném principu, jako dozimetry termoluminiscenční. Záření vybudí ve scintilátoru elektrony do vyššího energetického stavu a návrat elektronů do základního stavu se projeví jako světelné záblesky, které se opět měří fotonásobičem. Scintilátory mohou být konstruovány jako pevné krystaly anorganických resp. organických sloučenin (např. jodid sodný, resp. antracen), nebo roztoky či suspenze organických scintilátorů v organickém rozpouštědle, např. toluenu. Vzorky se pak měří přímo rozpuštěné ve scintilátoru.

**Polovodičové detektory** pracují na následujícím principu: záření způsobí v polovodiči přeskok elektronu do vodivostního pásu polovodiče. Působí – li na polovodič elektrické pole, projeví se tento přeskok jako náhlé zvýšení vodivosti a vhodné elektrické zařízení zaznamená elektrický impulz (Obr.16.8.). Polovodičové detektory jsou vyráběny obvykle z monokrystalu křemíku nebo germania. K uspokojivé činnosti potřebují chlazení na teplotu kapalného dusíku.

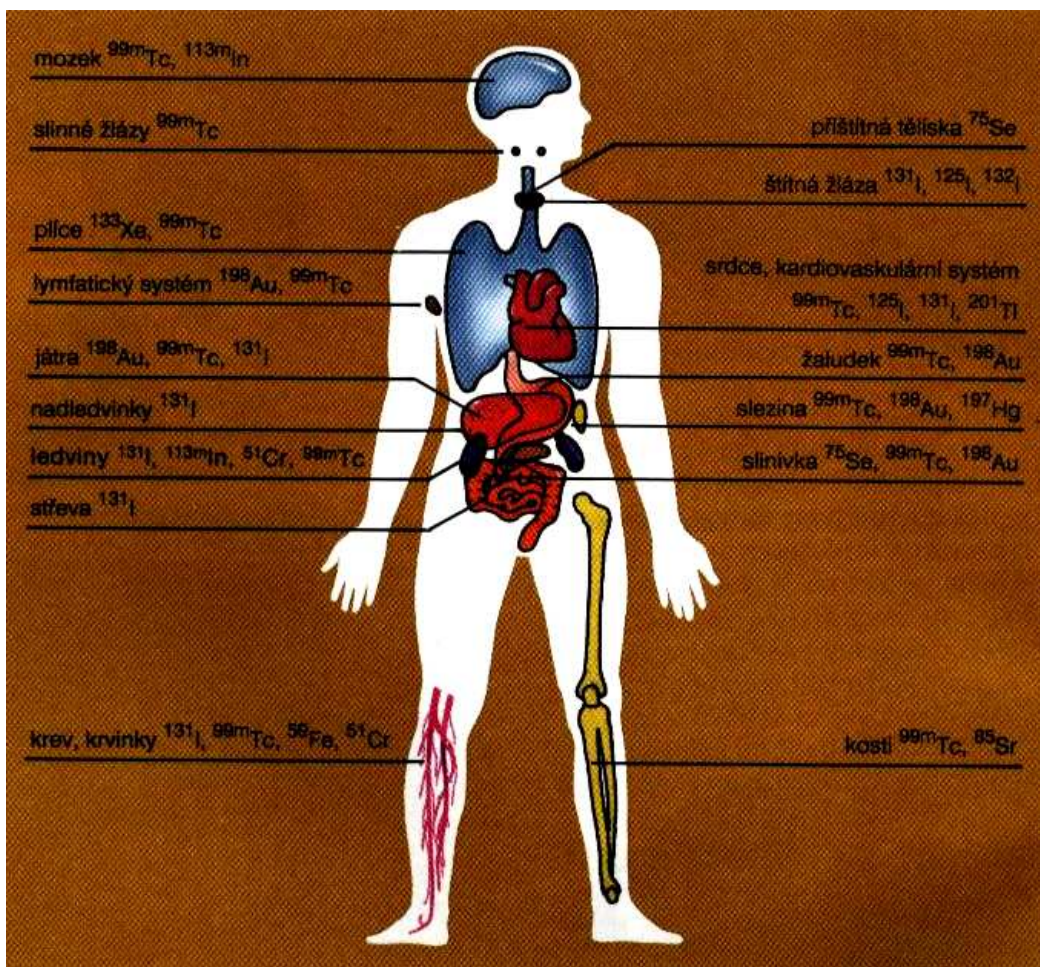


Obr.16.8. Schéma polovodičového detektoru.

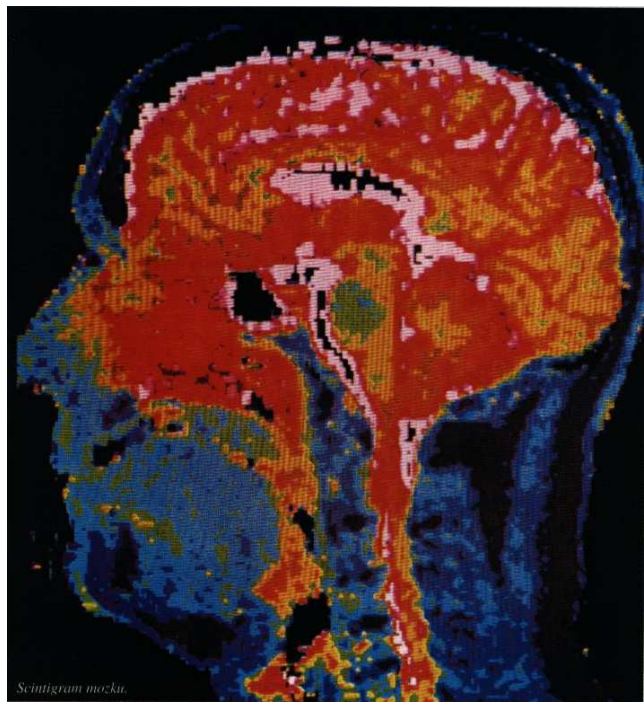
## **16.4 Využití ionizujícího záření ve zdravotnictví a v biologii.**

Ionizující záření má široké využití prakticky ve všech oblastech lidské činnosti, od průmyslu, přes zemědělství, až po zdravotnictví . Protože téma příspěvku je zaměřeno na lidské zdraví, všimneme si využití záření zejména ve zdravotnictví a v biologii. Ve zdravotnictví jsou radionuklidy využívány jak k léčebným, tak k diagnostickým účelům – tzv. **nukleární medicína**. Používané radioaktivní prvky se po chemické stránce nijak neliší od prvků neradioaktivních. Proto v praxi používáme takové sloučeniny, které se selektivně zachytávají a koncentrují ve vyšetřovaném orgánu nebo tkáni a které zase místo zachycení po jisté době opouštějí podle funkce orgánu nebo metabolických pochodů Jako příklad může sloužit použití radioaktivního jódu při vyšetřování správné funkce štítné žlázy, ve které se právě jód selektivně shromažďuje. Na Obr.16.9 jsou uvedeny orgány lidského těla spolu s prvky, které se v nich ukládají a na Obr.16.10 je uveden tzv. scintigram mozku, který vznikl tak, že pacientovi byl podáván radioaktivní prvek Tc, nebo In (Obr.16.9).





Obr.16.9. Jednotlivé orgány lidského těla a radionuklidy, používané k jejich vyšetření.



Obr.16.10. Scintigram mozku.

**Balneologie** používá radioaktivní materiály již velmi dlouho. Příkladem mohou být světoznámé lázně v Jáchymově, kde se vodou, obsahující radioaktivní radon léčí nemoci pohybového ústrojí, artróza, revmatismus apod.

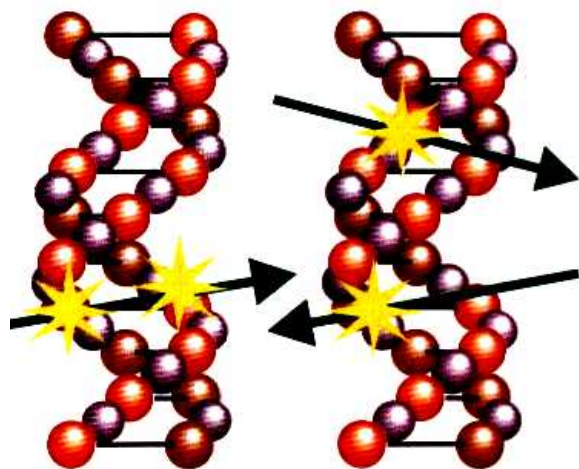
**Radioterapie** využívá účinků záření k léčení zhoubných nádorů. Nádory jsou tvořeny mladými buňkami, které se velmi rychle dělí a jsou mnohem citlivější vůči záření, než zdravá tkáň. K ničení zhoubných nádorů se nejčastěji používá rentgenové záření, nebo záření gama radionuklidů  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{226}\text{Ra}$ . Lze použít i urychlených elektronů apod.

**Leksellův gama nůž** se používá při velmi obtížných operacích mozkových nádorů. Gama nůž obsahuje 201 kobaltových zářičů ve formě proutků. Systém clon zajistí namíření jednotlivých paprsků záření do operovaného místa s přesností 0,1 mm. Vysoká dávka záření gama zničí v krátkém okamžiku a zcela bezbolestně přesně vymezený a ostře ohraničený kousek tkáně. Terapie trvá 5 až 30 minut, protože je vše řízeno počítačem. Většinou může jít pacient druhý den domů.

**Šlechtitelství** využívá působení záření na dědičnou informaci v buňkách. Tento proces je hybnou silou evolučního vývoje všech živých organismů. Zářením narušená dědičná informace v DNK (Obr.16.11) způsobí vznik tzv. *mutace*, která může být pozitivní, tj. směřující ke vzniku lepšího jedince, nebo opačná (ta je zpravidla potlačena pro ni nepříznivými podmínkami). Jestli do tohoto procesu zasáhne navíc člověk výběrem lepších jedinců, dochází například ke vzniku nových odrůd ovoce, zeleniny apod. Vznik nových odrůd lze urychlit tak, že např. rostliny ozáříme pronikavým zářením poměrně vysoké intenzity a tak lze získat rychle značný počet nových odrůd (v ovocnářství to jsou tzv. spurty jabloní, nové odrůdy jahod, obilí, atd.).

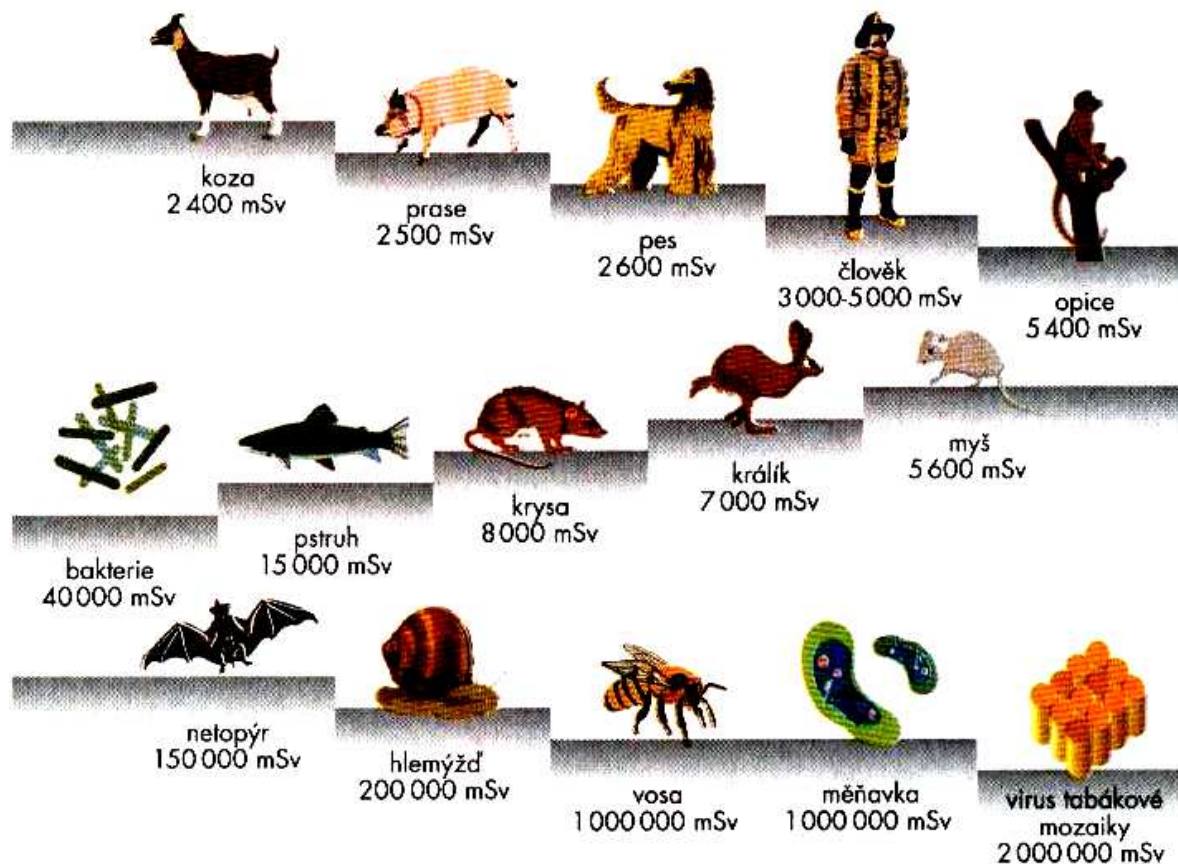
Poměrně dosti známé je i určování stáří odumřelých organismů pomocí tzv. **radiokarbonové metody**. Ta spočívá v měření aktivity zbytku izotopu uhlíku  $^{14}\text{C}$ , který se do živých organismů dostával z oxidu uhličitého, obsahujícího i tento radionuklid, vzniklý reakcí kosmického záření s dusíkem. Zatímco v živém organismu se udržuje množství  $^{14}\text{C}$  v rovnovážném stavu, po jeho úmrtí se již tento izotop prostřednictvím látkové výměny pochopitelně nedoplňuje a jeho zbytek se rozpadá. Protože poločas rozpadu tohoto izotopu je 5730 let, dává uvedená metoda spolehlivé výsledky pro období 5000 až 20 000 let. Lze ji tedy s výhodou používat v archeologii, antropologii i geologii.

Zajímavá je i **citlivost** různých organismů na ozáření. Na Obr.16.12 je tato citlivost znázorněna, je zde vynesena dávkový ekvivalent v mSv, který přežije polovina ozářených jedinců.



Obr.16.11. Interakce záření s molekulou DNK





Obr.16.12. Citlivost různých organismů na záření.

## 16.5 Radon a jeho vliv na lidské zdraví.

### **16.5.1 Historie objevu radonu.**

Brzy po objevu rádia bylo zjištěno, že předměty i vzduch v okolí otevřených radiových

preparátů mají rovněž radioaktivní vlastnosti. Tento jev byl nejdříve vysvětlován tzv. indukovanou radioaktivitou. Roku 1900 dospěl německý fyzik Dorn k názoru, že příčinou indukované radioaktivity je radioaktivní plyn, který se uvolňuje z rádia, podobně jako tomu je u thoria a aktinia (některé prameny uvádějí jako objevitele tohoto plynu francouzského vědce A.Deberna). Další práce (Rutherford, Ramsay, Soddy) prokázaly, že nový plyn má atomové číslo 86 a je tedy prvkem ze skupiny vzácných plynů. Jeho izotop s hmotovým číslem 222, vzniklý transmutací z  $^{126}\text{Ra}$  je radioaktivní a Rutherford jej navrhl nazvat „emanace“ (Em). Později byl tento plyn podle Ramsaye po krátkou dobu nazýván „niton“ (Nt) a nakonec nahrazen oficiálně přijatým názvem „radon“ (1923).

Radon má tři izotopy, náležející k radioaktivním řadám uranu, thoria a aktinia: radon  $^{222}\text{Rn}$  (emanace radia), thoron Tn, čili  $^{220}\text{Rn}$  (emanace thoria) a aktion An, čili  $^{219}\text{Rn}$  (emanace aktinia). Svůj název má radon podle izotopu  $^{222}\text{Rn}$  s nejdelším poločasem rozpadu – ten

vzniká jako produkt rozpadu  $^{226}\text{Ra}$  (1 g rádia emanuje asi  $1\text{ mm}^3$  radonu za 24 hodin). Izotop  $^{222}\text{Rn}$  má poločas rozpadu 3,825 dne a vyzařuje  $\alpha$  - částice, jejichž dolet ve vzduchu je při atmosférickém tlaku asi 4 cm.

Koncentrace radonu v atmosféře je odhadována na  $6.10^{-18}$  % objemových. Při pokojové teplotě je radon plynem, jehož bod varu je  $t_{\text{varu}} = -62\text{ }^{\circ}\text{C}$  a bod tání  $t_{\text{tání}} = -71\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Stejně jako ostatní inertní plyny se neúčastní na vzniku chemických sloučenin, může tvořit pouze molekulární (komplexní) sloučeniny, např.  $\text{Rn} \cdot 6\text{ H}_2\text{O}$  (hexahydrát radonu). Radon navzdory své chemické netečnosti je považován za jedovatý, což souvisí s jeho radioaktivitou.

## 16.5.2 Člověk a radioaktivita.

Radioaktivita nás doprovází odedávna, doslova od kolébky až do hrobu a stala se součástí životního prostředí kolem nás, kterou si přímo neuvědomujeme, neboť je našimi smysly nepostizitelná. Uvědomovat si ji začneme a více o ní hovořit teprve tehdy, až se nějakým způsobem projeví její záporné účinky (zpravidla na našem zdraví), nebo ji potřebujeme využít k nějakému účelu.

Jako typický příklad z minulosti můžeme uvést téměř tajemné a v tehdejší době nevysvětlitelné jevy, ke kterým docházelo v Jáchymově. Tam se totiž již ve středověku dolovalo stříbro a město v té době značně vzkvétalo. Stříbrné žíly však byly často doprovázeny zvláštní černou a těžkou horninou, která byla horníky nazývána „Černou smrtí“, zřejmě podle svých účinků - rakoviny plic. Její druhý název, méně hrozivý, byl „Smolinec“, neboť přinášela smůlu (její nalezení signalizovalo obvykle konec stříbrné žíly). Ženy horníků z Jáchymovska byly zaměstnány v místních sklárnách a malovaly sklo barvou, získanou z rozdrčeného smolince. Protože štětec mezi rty upravovaly do špičky, trpěly často rakovinou rtů a ústní dutiny. Tajemství černé horniny rozřešili až v roce 1926 manželé Curieovi, když objevili její radioaktivitu a izolovali z ní prvek rádiu.

Neblahé účinky radioaktivních látek na živé organismy si lidstvo začalo od té doby uvědomovat stále více (od výbuchů atomových bomb v Japonsku na konci II. světové války, přes následky zkušebních atomových výbuchů v době studené války, až po Černobylskou havárii v roce 1986). Protože se jedná často o účinky skutečně katastrofální, mohlo se snadno stát a stále se stává, že strachu z radioaktivity lze využít (zejména když se zpolitizuje), ke zpomalení, nebo i k znemožnění mírového využití jaderné energie. Příkladem mohou být akce, zaměřené proti výstavbě a činnosti jaderných elektráren (u nás zejména proti dostavbě jaderné elektrárny Temelín), přestože víme, že náš další vývoj si bez nich umíme těžko představit.

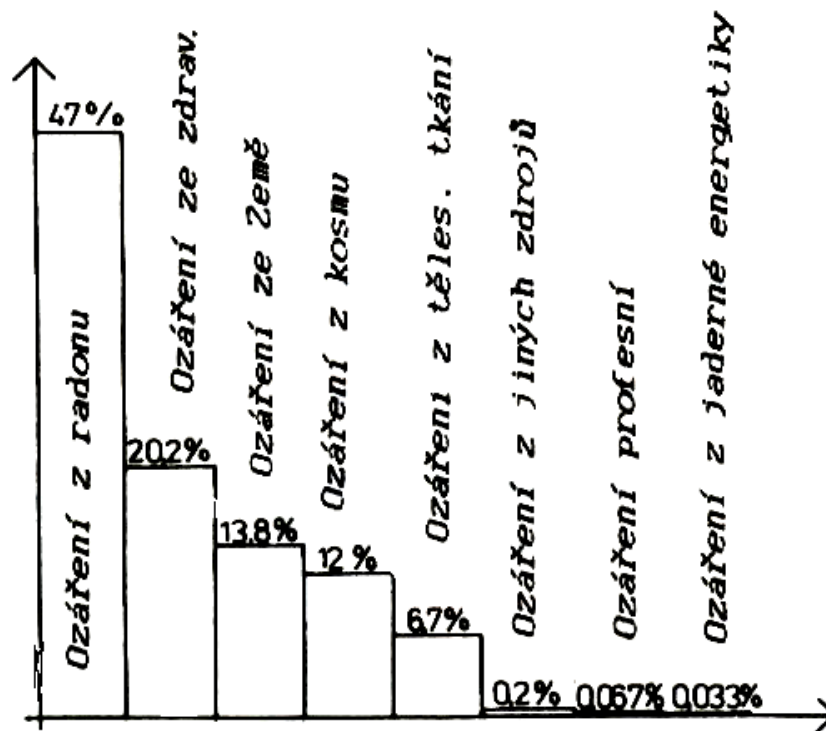
V posledních desetiletích se k těmto obavám přidal i strach ze škodlivých účinků radonu a jeho dceřinných produktů. Jak již bylo uvedeno, vzniká radon jako produkt rozpadu uranu 238 a v další kapitole si tohoto rozpadu všimneme podrobněji. Radon proniká z půdy nejen do ovzduší, ale i do našich obydlí, kde se koncentruje, rozpadá a vytváří část vnitřního mikroklimatu, negativně působícího na zdraví člověka. Samotný radon, je-li vdechnut do plic, je z nich opět z velké části vydechnut ven. V plicích však zůstávají produkty jeho rozpadu (těžké kovy). Tyto tzv. dceřinné produkty, ať už volné, nebo usazené na aerosolech a prachových částicích, zůstávají v dýchacích cestách a plicních sklípcích, kde se dále rozpadají a „bombardují“ s vysokou rozpadovou energií citlivou tkáň, takže ji mohou nevratně poškodit.

Proč nás radon zajímá až nyní, vždyť s ním lidstvo žije již po dlouhá desetiletí? Důvodů může být několik:

- Radon sice v dřívějších dobách vnikal velice snadno do lidských obydlí přes udusanou hlínu, prkennou či kamennou podlahu, ale stejně snadno z nich unikal komínem, spárami a jinými netěsnostmi v oknech, dveřích či střeše, jinými slovy, snadno se odvětrával. V současné době, kdy se snažíme uspořít co nejvíce energie, je přirozené

odvětrávání omezováno a radon spolu se svými dceřnými produkty se v místnostech koncentrují.

- V posledních desetiletích vzrostlo silně znečištění životního prostředí. Účinky jednotlivých toxických látek se sčítají a výsledkem je narušení zdravotního stavu lidské populace. V takovém případě mohou v porovnání s minulostí stačit nižší dávky ozáření ke vzniku některých nemocí.
- Třetí důvod plyne z Obr.16.13, kde je uvedeno složení průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu ozáření obyvatelstva v závislosti na původu záření. Z obrázku je vidět kromě jiných překvapivých zajímavostí, že radon a jeho dceřné produkty se podílejí na ozáření obyvatelstva téměř z 50% a je třeba poznamenat, že v eliminaci tohoto zdroje záření jsme zatím příliš nepokročili.



Obr. 16.13. Skladba průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu ozáření (3mSv = 100%). Zpracováno podle zprávy vědeckého výboru OSN pro účinky atomového ozáření.

### 16.5.3 Radon a jeho dceřné produkty.

Radon patří mezi inertní plyny a každý z nás s ním přichází do styku denně a prakticky kdekoliv. Vzniká zcela samovolně jako jeden z produktů uran – radiové rozpadové řady. Jeho poločas rozpadu je 3,825 dne a rozpadá se na své dceřné produkty  $^{218}\text{Po}$  (Ra A),  $^{214}\text{Pb}$  (Ra B),  $^{214}\text{Bi}$  (Ra C) a  $^{214}\text{Po}$  (Ra C') (Obr.16.14). Jsou to kovy, které se ve vzduchu mohou pohybovat volně v atomárním stavu, nebo se mohou vázat na aerosoly či prachové částice a tak mohou být vdechnuty do plic a tam zachyceny.

Radioaktivitu radonu a jeho dceřných produktů měříme v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  (becquerel) – tzv. *objemová aktivita*. Objemová aktivita radonu ve vzduchu, rovná  $50 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$  znamená, že v  $1 \text{ m}^3$  vzduchu dojde za 1 sekundu k  $50 \cdot 10^3$  radioaktivním přeměnám. Objemová aktivita radonu v kapalinách je udávána v  $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ , aktivita pevných látek v  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Primárním zdrojem radonu v geologickém prostředí je  $^{238}\text{U}$ , přítomný v horninách. Uran tvoří samostatné minerály (např. uraninit, nebo uranové slídy), nebo je přítomen

v horninotvorných materiálech (např. biotit a apatit). Obecně lze říci, že nejvyšší obsah uranu je ve vyvřelých horninách (durbachit, žula), střední v horninách metamorfovaných (pararuly) a nejnižší v sedimentech (pískovce, jílovce). Dalším zdrojem uranu jsou podzemní vody a stavební materiál. Ty jsou však méně podstatné.

Prvek	Značka	$T_{1/2}$	Typ zář.
Uran 238	U	$4,5 \cdot 10^9$ let	$\alpha, \gamma$
Rádium 226	Ra	1600 let	$\alpha$
Radon 222	Rn	3,825 dne	$\alpha, \gamma$
Rádium A (Polonium 218)	RaA	3,05 min	$\alpha$
Rádium B (Plumbum 214)	RaB	26,8 min	$\beta, \gamma$
Rádium C (Vismut 214)	RaC	19,7 min	$\beta, \gamma$
Rádium C' (Polonium 214)	RaC'	$1,6 \cdot 10^{-4}$ s	$\alpha$
Rádium C'' (Thálieum 210)	RaC''	1,32 min	$\beta$
Rádium D (Plumbum 210)	RaD	22,2 let	$\beta, \gamma$
Rádium G (Plumbum 206)	RaG	stabil. nerad. prvek	

Obr.16.14. Rozpadová řada  $^{238}\text{U}$  a dceřinné produkty radonu.

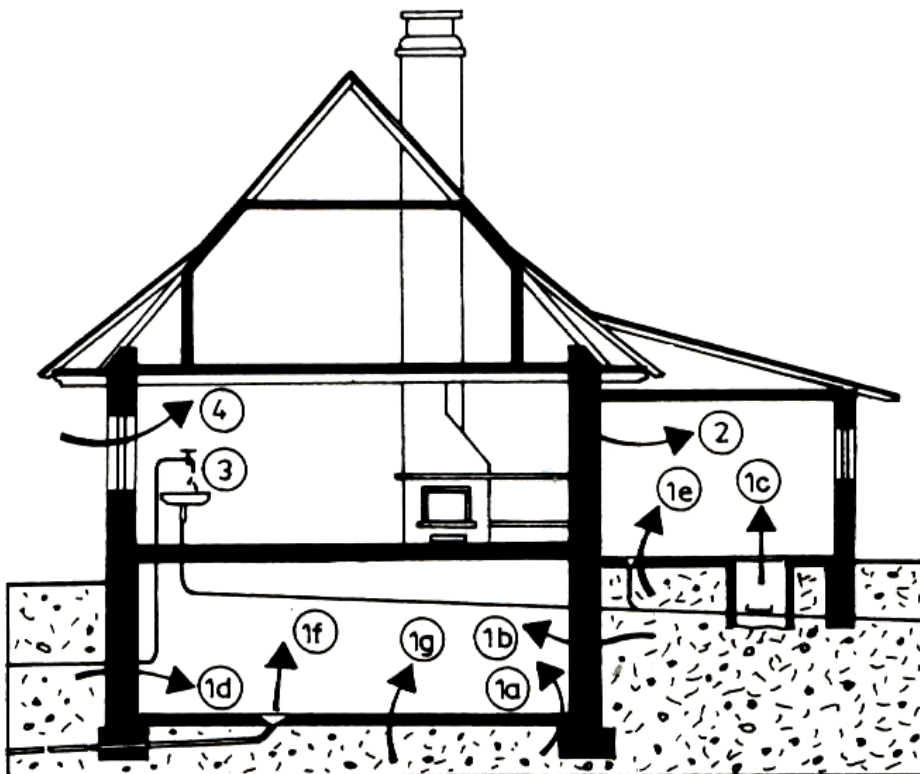
Způsoby pronikání radonu do lidských obydlí jsou schematicky uvedeny na Obr.16.15. Z něho plyne, že jsou to zejména trhliny a netěsnosti v podlaze sklepa, nebo nejnižšího podlaží, drenážní potrubí, případně studny a studánky. Rovněž to může být stavební materiál (např. pórobetonové tvárnice, vyráběné dříve z některých druhů popílku) a též venkovní vzduch.

V důsledku proudění vzduchu v místnostech se radon rozptýlí prakticky rovnoměrně po celém jejich objemu. Jeho koncentrace se však mění v závislosti na denní či noční době (závislost je i na rozdílu venkovní a vnitřní teploty, větru apod.) a rovněž je pozorována závislost na ročním období. Nejvyšší koncentrace radonu bývá zaznamenávána v nevětraných sklepních a přízemních místnostech.

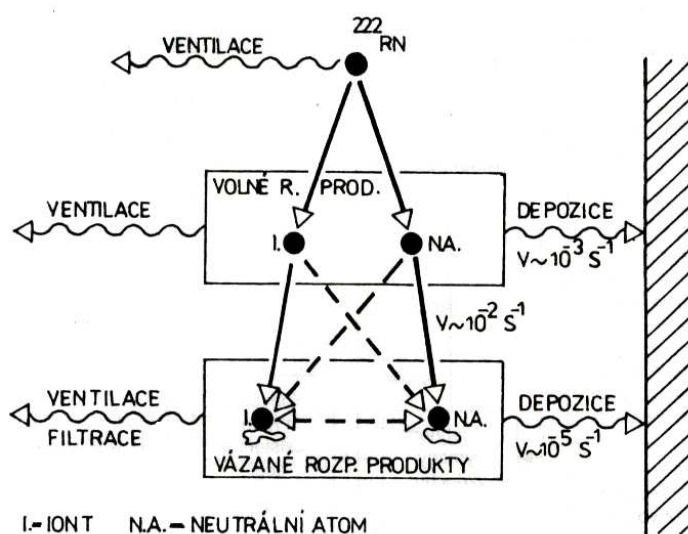
Dceřinné produkty radonu, které vznikly  $\alpha$  nebo  $\beta$  rozpadem, mohou po určitou dobu existovat v atomárním stavu. Převážná část z nich se však rychle naváže na aerosoly a prachové částice, nebo na povrchy stěn a nábytku (Obr.16.16).

Z tohoto kvalitativního rozboru plyne, že koncentrace aerosolů a prachových částic v určitém objektu je důležitým faktorem, který musíme vzít v úvahu nejen při měření koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů samotném, ale i při odhadu poškození zdraví

člověka. Budeme-li totiž měřit koncentraci dceřinných produktů radonu v místnosti se stálou objemovou aktivitou radonu, potom při vysoké koncentraci prachových částic naměříme z výše uvedených důvodů vyšší hodnotu aktivity, než při koncentraci nízké. Proto je třeba znát koncentraci aerosolových a prachových částic, přítomných v interiéru. Další možností je přímé (absolutní) měření koncentrace radonu, které není ovlivněno výskytem aerosolů a prachových částic.



Obr.16.15. Cesty vnikání radonu do lidských obydlí.



Obr.16.16. Volné a vázané produkty rozpadu v interiéru budov.



## 16.5.4 Vliv radonu na zdraví člověka.

Jak jsme již uvedli, není pro člověka samotný radon nebezpečný, jeho zdraví však mohou ohrozit dceřinné produkty radonu. Radon je vdechován a vydechován prakticky bez ozáření tkání. Zato dceřinné produkty, ať již volné, nebo usazené na aerosolech a prachových částicích, se usazují v průduškách a plicních sklípcích člověka a ozařují je. Nebezpečné jsou zejména částice  $\alpha$  o doletu několika desítek  $\mu\text{m}$ , neboť jejich veškerá energie je soustředěna do malé oblasti živé tkáně plic – nejcitlivější je tzv. tracheobronchiální oblast plic. Lékařský výzkum dospěl k závěru, že toto ozařování je jedním z faktorů, podílejících se na vzniku rakoviny plic. Žádné jiné zdravotní účinky radonu ani jeho rozpadových produktů na zdraví člověka nebyly pozorovány (ani střídání pití vody s radonem neškodí – žaludek je zřejmě v tomto směru evolucí prověřený a dosti otrlý).

Co se týká škodlivosti volných a vázaných rozpadových produktů, shodli se vědci na závěru, že volné rozpadové produkty jsou asi 30x škodlivější, než produkty vázané. Pravděpodobně je to tím, že mnohem lehčí volné částice (atomární) nemají díky malé setrvačnosti tak velkou kinetickou energii a usadí se při vdechnutí již na začátku plic (tracheobronchiální oblast). Těžké útvary – prach a aerosoly, dolétnou až do plicních sklípků, které však nejsou tak silně ozářeny, jako by tomu bylo v případě volných částic, neboť vzdálenost mezi vyzářující částicí a sliznicí je mnohem větší. Navíc jsou naše plíce vybaveny dokonalým, evolucí prověřeným mechanismem, dovolujícím odstranit (vykašlat) usazené prachové částice.

Ozáření plicní sliznice je dále závislé na věku, rychlosti dýchání, samočisticí schopnosti plic a vůbec na celkovém zdravotním stavu jedince. Výsledky měření průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu se z uvedených důvodů značně od sebe liší. Můžeme však říci, že pravděpodobnost vzniku rakoviny plic je úměrná celkové vdechnuté aktivitě dceřinných produktů radonu, tj. závisí na koncentraci radonu a délce pobytu v místnosti s určitou jeho koncentrací. Abychom si co nejvíce přiblížili riziko ozáření plic produkty radonu, používáme srovnání jeho účinků s neblahými účinky kouření cigaret. Z měření, uskutečněných u nás i v zahraničí plyne, že dceřinné produkty radonu mají na svědomí 10 – 30% onemocnění rakovinou plic (zřejmě jde převážně o nevysvětlitelná onemocnění zdravě žijících nekuřáků).

Na základě doporučení Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu byly v naší republice stanoveny tyto mezní hodnoty rovnovážné objemové aktivity dceřinných produktů radonu  $C_{\text{ekv}}$ :

- stávající zástavba .....  $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
- nová zástavba .....  $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Jsou-li tato meze překročeny, má majitel domu nárok na státní finanční podporu na učinění ozdravných antiradonových opatření (u nové zástavby jsou povinná). Abychom mohli posoudit nutnost realizace ozdravných opatření, jsou objekty rozděleny do několika kategorií podle stupně překročení základní zásahové úrovně  $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

1.  $C_{\text{ekv}} = 200 - 600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $C_{\text{Rn}} < \text{cca } 1200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Opatření by měla být provedena nejpozději do 10 let od zjištění stavu. Většinou postačí jednodušší, méně náročné zásahy.

2.  $C_{\text{ekv}} = 600 - 2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $C_{\text{Rn}} < \text{cca } 4000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Stavebně technické úpravy je nutno provést do 3 let. Riziko rakoviny plic je srovnatelné s lehkým kuřáctvím.

3.  $C_{\text{ekv}} = 2000 - 6000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $C_{\text{Rn}} < \text{cca } 12\,000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Vysoká naléhavost řešení situace, opatření je nutné realizovat do 1 roku. Lze očekávat poměrně vysoké finanční náklady a proto je třeba zvážit účelnost investice z hlediska stáří a hodnoty budovy. Riziko rakoviny plic je srovnatelné s kouřením asi dvou balíčků cigaret denně.

4.  $C_{ekv} > 6000 \text{ Bq.m}^{-3}$  ( $C_{Rn} > \text{cca } 12\,000 \text{ Bq.m}^{-3}$ ).

Mimořádně vysoká naléhavost řešení, zahájení ozdravných opatření by mělo být provedeno okamžitě. Představuje značné zásahy do konstrukce obydlí a vyžaduje vystěhování uživatelů. Riziko rakoviny je srovnatelné s rizikem těžkého kuřáka.

### 16.5.5 Zdroje radonu, ozdravná opatření.

Již v úvodní části bylo řečeno, jakým způsobem proniká radon nejčastěji do našich obydlí (Obr.16.15). Nyní provedeme podrobnější diskusi těchto možností spolu s ukázkou některých základních typů ozdravných opatření.

Radon je do místností uvnitř objektu nasáván spolu s půdním vzduchem v důsledku podtlaku v interiéru vzhledem k vnějšímu prostředí. Hlavním transportním mechanismem plynu v moderních obydlích se základovou betonovou deskou je proudění půdního vzduchu trhlinami v této desce a v suterénních stěnách. Uvedeme nejdůležitější faktory, které ovlivňují tento transport:

a) velikost podtlaku v budově. Nasávání radonu s půdním vzduchem je závislé na tlakovém rozdílu mezi základovou půdou a spodní částí budovy. Tato tlaková diference je způsobena odlišností hustot venkovního a vnitřního vzduchu. U nižší zástavby je to v zimním období 2 – 10 Pa, u desetipodlažních budov to bývá až 30 Pa. Účinek rozdílu tlaku je podporován vertikálními komunikacemi – šachtami, komíny, schodišti.

*Snahou projektantů by mělo být rozdělení schodišťového prostoru do několika částí, oddělených dobře utěsněnými dveřmi. Ventilační zařízení by měla svými účinky eliminovat podtlak.*

b) Koncentrace radonu v půdním vzduchu. Koncentrace radonu v půdním vzduchu se mění s místem i časem a je ovlivňována zejména měrnou aktivitou  $^{226}\text{Ra}$  v mateřské hornině a propustností půdních vrstev. Největší aktivitu vykazují vyvřelé horniny a nejnižší naopak různé sedimenty. To je názorně vidět z údajů, uvedených v Tab.1.

Hornina	$A_{Rn} / \text{Bq.m}^{-3} /$	Hornina	$A_{Rn} / \text{Bq.m}^{-3} /$
Žula	75 – 150	Spraš	30 - 50
Znělec	65 – 135	Vápenec	30 - 35
Granodiorit	50 – 140	Čedič	15 - 40
Křemenec	5 – 180	Písek	5 - 30
Břidlice	35 - 130	Sádrovec	15
Rula	30 – 80	Dolomit	15
Porfyr	30 – 70	Opuka	10

Tab.1.

Geologickou stavbu ČR tvoří ze dvou třetin metamorfované horniny krystalinika (porfyr, ortoruly, metabazity atd. – Obr.16.17). Velké plošné zastoupení mají i vyvřelé horniny (granity, granodiority, diority, syenity, pegmatity, durbachity). Dalším typem hornin s velkým plošným rozsahem jsou pískovce, které protože jsou dobrým transportním prostředím pro vodu a plyny, mohou sloužit jako přirozené zásobárny radonu. Všechny tyto horniny obsahují stopová množství radioaktivních prvků, z nichž nejdůležitějšími jsou  $^{238}\text{U}$  a  $^{226}\text{Ra}$ .

Radon je z míst jeho vzniku transportován přes následné vrstvy a jeho transport je ovlivňován zejména složením zeminy (pískem se šíří nejsnadněji) a její vlhkostí (radon je ve vodě dobře rozpustný). Rovněž spodní voda dobře transportuje radon – studánky a studny bývají jeho vydatnými zdroji.

c) Propustnost půdních vrstev pod základy. Odvětrávání radonu, neboli výměna vzduchu mezi povrchovými vrstvami a atmosférou, je závislé na plynopropustnosti těchto povrchových vrstev. Budou-li propustné, může se radon odvětrávat a lze v nich očekávat jeho nižší koncentraci. Naopak pod nepropustnou (např. jílovou) vrstvou se bude radon hromadit. Přitom může mít nepropustnost pouze sezónní charakter (zaplnění pórů vodou, zmrznutí mokré půdy). Podobně působí rozsáhlé betonové a asfaltové plochy kolem obydlí a dokonce obydlí samo – čím lépe je dům utěsněn vůči zemině pod ním, tím vyšší je koncentrace radonu pod ním. Lze tedy závěrem říci, že pro významné zvýšení přítomnosti radonu v interiéru musí být splněny tyto podmínky:

1. pod základy budovy musí být dostatečné množství půdního vzduchu,
2. půdní vzduch musí být radonem dostatečně nasycen,
3. geologická vrstva pod základy musí být propustná.

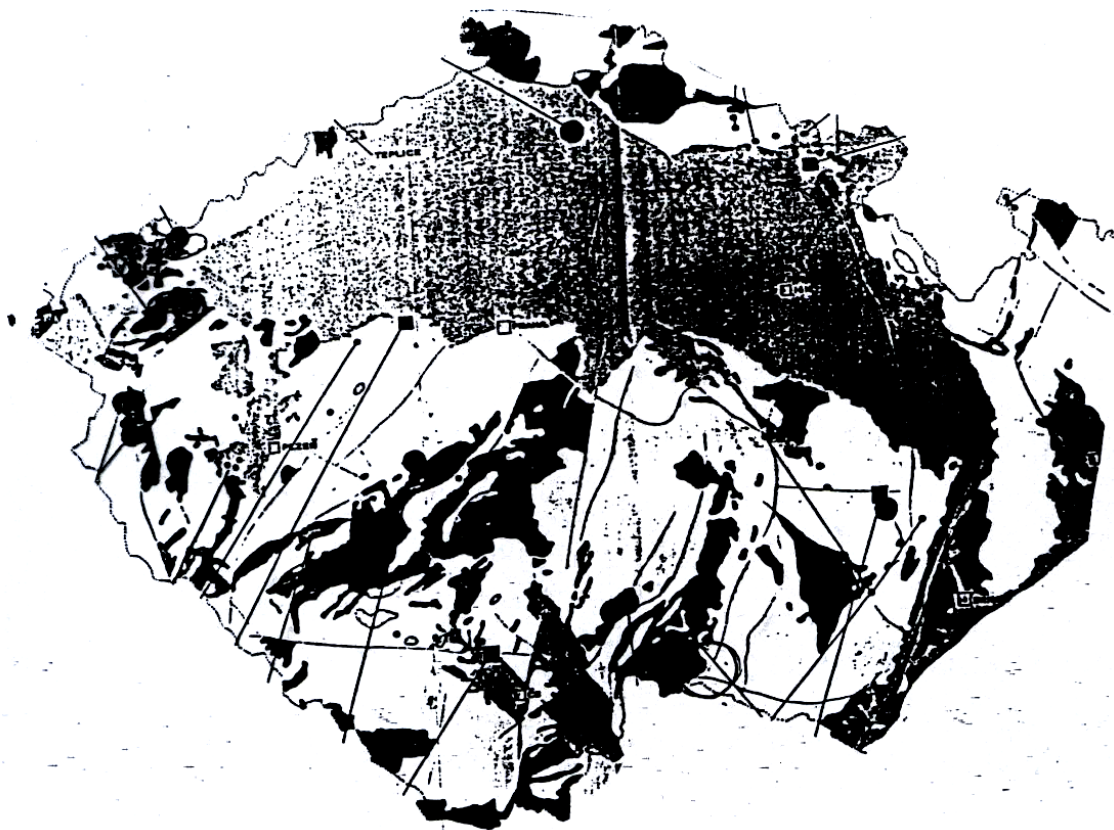
d) Těsnost základových a suterénních konstrukcí. Těsnost a neporušenost základových a suterénních konstrukcí má rozhodující podíl na koncentraci radonu v interiéru. Všechny dříve uvedené předpoklady pro vstup radonu do budovy mohou být splněny, ale budou-li základové konstrukce bez trhlin, radon se do budovy nedostane. Protože koncentrace radonu v půdním vzduchu bývá zpravidla asi 1000 x vyšší, než jaká je potom ve vnitřních prostorách budov, stačí k dosažení přípustných hodnot jenom velmi malá plocha netěsností. Kromě toho může být i samotný stavební materiál radioaktivní. V ČR byla v roce 1991 omezena vyhláškou MZd 76/91 aktivita stavebního materiálu maximální hodnotou  $120 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Je však třeba upřesnit, že toto omezení se vztahuje pouze na stavební materiály, které jsou určeny k výstavbě budov pro bydlení, individuální rekreaci a k výstavbě objektů, v jejichž místnostech se osoby zdržují více jak 1000 hodin ročně (kanceláře, učebny ve školách, prodejny, sály kin apod.). V místnostech takových objektů pak v kterémkoliv místě ve výšce 1 m od podlahy a ve vzdálenosti alespoň 0,5 m od stěn nesmí příkon dávkového ekvivalentu překročit hodnotu  $2 \cdot 10^{-6} \text{ Gy.h}^{-1}$ . Dále se požaduje, aby součet podílů ekvivalentu objemové aktivity radonu v průměru za rok k hodnotě  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  a podílu fotonového dávkového ekvivalentu k hodnotě  $2 \cdot 10^{-6} \text{ Gy.h}^{-1}$  nebyl větší, než jedna.

Z předcházejících úvah plynou následující *ozdravná opatření*, vedoucí ke snížení koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů v obytných budovách:

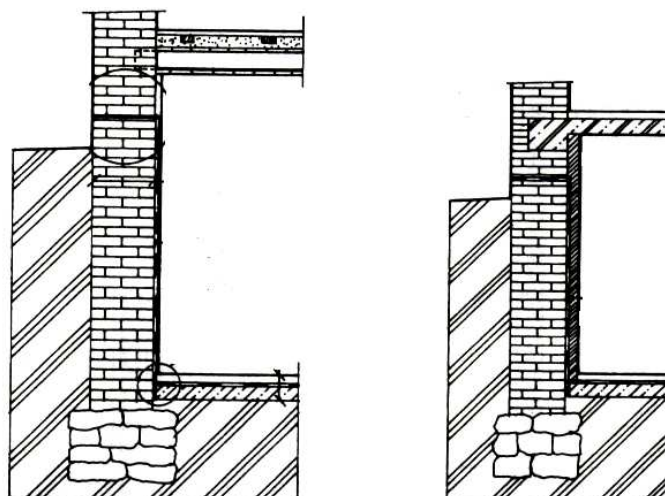
- a) Odstranění, nebo snížení podtlaku v objektech.
- b) Zvýšení těsností konstrukcí, které jsou ve styku se zeminou.
- c) Snížení propustnosti půdních vrstev.
- d) Snížení koncentrace radonu v půdním vzduchu.

Z těchto opatření plynou pro projektanty budov některé jednoduché i složitější zásady, po jejichž splnění lze podstatně zmenšit difúzi radonu do budov. Dále se pokusíme vyjmenovat alespoň ty nejpodstatnější a cenově nejdostupnější :

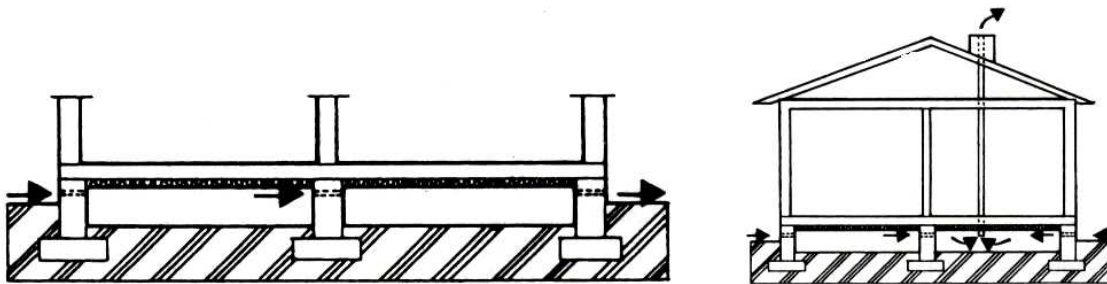
- *Betonová deska*, dobře armovaná ocelovými pruty a vyrobená z kvalitního ztuhlého betonu, čímž se zamezí vzniku trhlin.
- *Protiradonové nátěry a tapety*, například asfaltované pásy s hliníkovou, měděnou, nebo olověnou vložkou, známé pod různými obchodními názvy, jako FOALBIT, BITALBIT, ALFOBIT, BITAL, CUFOLBIT, modifikované PE nebo etylén-propylénové fólie apod. (Obr.16.18).
- *Konstrukční prvky, omezující vnikání radonu do budov*, některé z nich jsou uvedeny schematicky na Obr.16.19 (výstavba na pilířích), Obr.16.20 (izolace vzduchovou mezerou). Obr.16.21 (radonové studně a vytváření přetlaku pod budovou), atd.



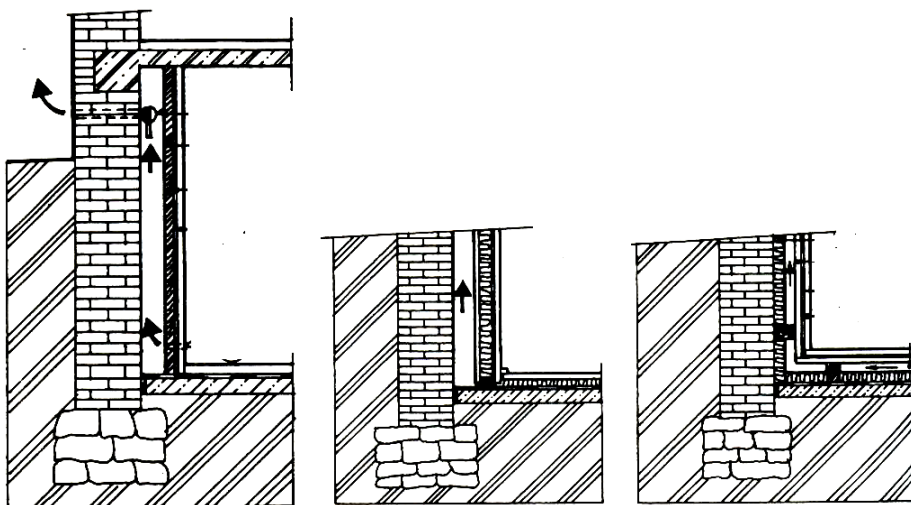
Obr.16.17. Radonové riziko v ČR. Tmavé oblasti vyznačují žulové podloží s vyšším radonovým rizikem



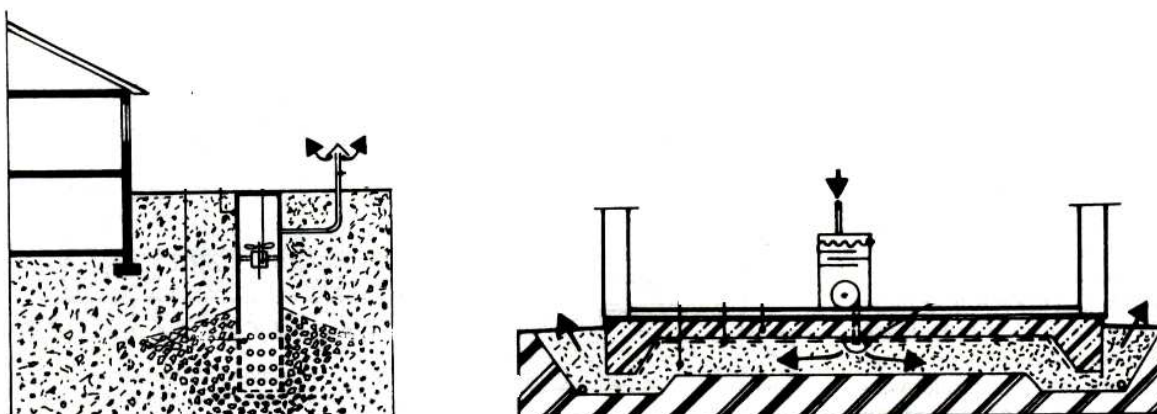
Obr.16.18. Antiradonové pasivní opatření pomocí vnitřní izolace.



Obr.16.19. Aktivní antiradonové opatření – výstavba na pilířích.



Obr.16.20. Aktivní antiradonové opatření – vnitřní odvětrávací mezera.



Obr.16.21. Aktivní antiradonová opatření – radonová studna a nucené odvětrávání základů.



## 16.5.6 Měření koncentrace radonu v interiérech budov.

První měření koncentrace radonu provedl v roce 1910 F.Schiffner v uranových dolech v Německu. Ze tří odběrů zjistil průměrnou koncentraci radonu ve vzduchu  $142,4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . V České republice byla provedena obdobná měření v roce 1924 v Jáchymově, kde F.Běhounek zjistil ze šesti odběrů průměrnou hodnotu  $159,1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Měření radonu a jeho dceřinných produktů je na rozdíl od měření přírodní radioaktivity velmi problematické, neboť jeho koncentrace ve vzduchu je ovlivněna mnoha činiteli. Stačí např. obytnou místnost vyvětrat a jejich koncentrace klesne na zlomek původní hodnoty. Již dříve jsme uvedli, že koncentrace radonu kolísá během dne i během roku, závisí na tom, zda je budova vytápěna, na meteorologických podmínkách, atd. Z toho plyne, že okamžité naměřené hodnoty koncentrace radonu jsou zatíženy velkou chybou a je tedy nutno ji měřit dlouhodobě. Podle způsobu měření rozdělujeme taková měření na *integrální a kontinuální*.

*Integrální měření* zachycuje velikost průměrné koncentrace radonu v měřicím místě za sledované období, které nesmí být kratší, než sedm dní a nemá být delší, než jeden rok. Taková měření jsou realizována zpravidla pomocí *stopových detektorů* (citlivé filmy, umístěné v plastové kazetě na daném místě. Stopy částic alfa jsou vyhodnocovány leptáním), nebo pomocí *detektorů elektretových* (jejich princip spočívá ve vybíjení speciálního, kladně nabitého materiálu, umístěného v měřicí komůrce).

*Kontinuální měření koncentrace radonu* stanoví časový průběh koncentrace v daném časovém intervalu. Předností těchto měření je možnost zaznamenání dynamiky změn koncentrace radonu v závislosti na různých, dříve uvedených činitelích. Tyto přístroje jsou většinou založeny na principu prosávání vzduchu, který obsahuje dceřinné produkty radonu, vázané na prachových a aerosolových částicích, přes filtr z mikrovláken. Rozpadové produkty, usazené na filtru vyzařují  $\alpha$  - záření, které je detekováno nejčastěji křemíkovými detektory, umístěnými v těsné blízkosti filtru.

**Poznámka: Ekvivalentní objemová aktivita radonu (EOAR) a latentní energie.**

Každá prachová částice, na níž je vázán některý dceřinný produkt radonu, sebou nese určité nebezpečí, že při vdechnutí se zachytí v plicích, rozpadne se a následně ozáří tkáň. Toto riziko se tedy skládá z pravděpodobnosti záchytu prachové částičky s navázaným dceřinným produktem v plicích a z množství energie záření alfa, které je schopno uvolnit. Toto množství energie je označováno jako *latentní energie* záření alfa. Uvedená energie je definována jako celková energie záření alfa, vyzářená tímto dceřinným produktem až do přeměny na  $^{210}\text{Pb}$  – viz Tab.2.

Dceřinný produkt radonu	Latentní energie [ MeV ]
<b>Ra A</b>	<b>13,690</b>
<b>Ra B</b>	<b>7,687</b>
<b>RaC</b>	<b>7,687</b>
<b>RaC'</b>	<b>7,687</b>

Tab.2.

Záření, které vzniká při rozpadu dceřinných produktů radonu měříme pomocí přístrojů, které potom udávají *ekvivalentní objemovou aktivitu radonu* (EOAR). Jednotkou EOAR je  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jedná se o takovou objemovou aktivitu radonu, která je v radioaktivní rovnováze s dceřinnými produkty. Jejich latentní energie je rovna latentní energii dané nerovnovážné

směsi dceřinných produktů radonu. Rovnovážný stav je definován tak, že v jednotce objemu vzduchu mají dceřinné produkty stejnou aktivitu, jako radon. Kritériem pro přiřazení „rovnovážného“ stavu je požadavek, aby koncentrace latentní energie směsi dceřinných produktů byla v obou případech, tj. v rovnovážném i nerovnovážném stavu stejná. Koncentrací latentní energie směsi dceřinných produktů ve vzduchu rozumíme maximální množství energie záření alfa, které by se vyskytlo při vdechnutí jednotky objemu vzduchu za předpokladu stoprocentního záchytu všech aerosolů a prachových částic v dýchacím traktu. Protože v interiéru budov je v důsledku ventilace a depozice na stěnách, podlaze, aerosolech a prachových částicích koncentrace dceřinných produktů vždy nižší, než koncentrace samotného radonu (neexistuje tedy výše zmíněná radioaktivní rovnováha), zavádí se tzv. rovnovážný faktor  $F$ . Ten je vyjádřen podílem

$$F = \text{EOAR} / \text{OAR}_n ,$$

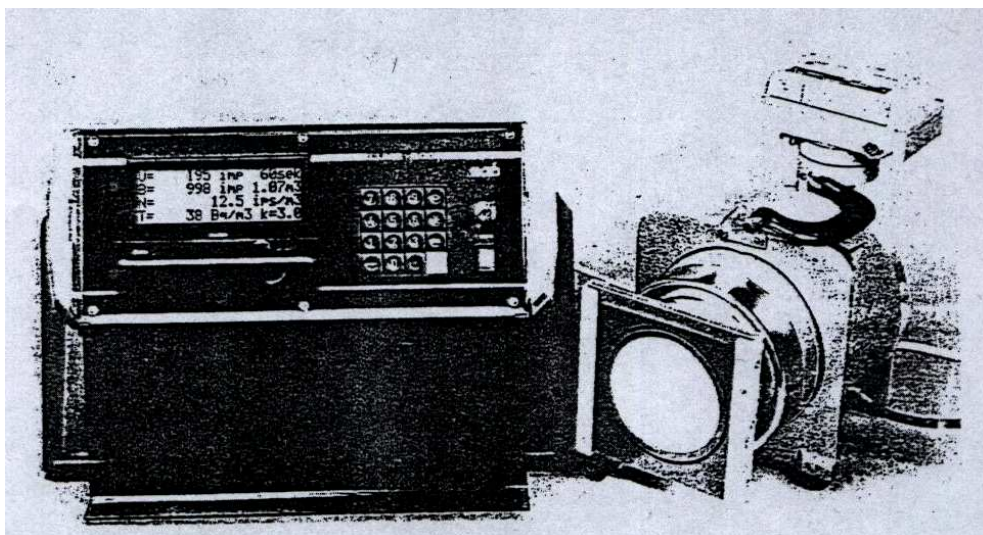
kde EOAR je ekvivalentní objemová aktivita radonu a  $\text{OAR}_n$  je skutečná koncentrace (objemová aktivita) radonu. Hodnota tohoto rovnovážného faktoru  $F$  se pohybuje v mezích 0,2 – 0,6.

### **16.5.7 Měření okamžité koncentrace dceřinných produktů radonu pomocí přístroje LLM 500 (Living Level Monitor 500).**

Přístroj LLM 500 je zařízení, které měří okamžitou hodnotu EOAR .Byl vyvinut nejen pro měření EOAR v terénu a v budovách, ale je vhodný i jako demonstrační pomůcka zejména pro školy, neboť jeho velkou předností je velmi snadná obsluha. Vyvinul jej Prof. Henning von Philipsborn na Universitě v Regensburgu a je vyráběn firmou Münchener Apparatebau GmbH .

Celé zařízení (Obr.16.22) se skládá z nasávacího agregátu a z počítače, který celé měření vyhodnocuje. Výsledky lze rovněž registrovat pomocí tiskárny, nebo PC.

Postup měření EOAR je následující: do nasávacího agregátu, v jehož vstupní části je umístěn filtr ze skelných vláken a filtrační „disketa“ je nasáván vzduch, jehož množství je měřeno průtokoměrem. Aerosoly a prachové částice se zachytí na vláknech diskety, kterou poté zasuneme do přístroje a ten ji během velmi krátké doby vyhodnotí (i s uvažováním okamžité hodnoty pozadí). Velkou předností LLM 500 je možnost okamžitého převodu EOAR na skutečnou koncentraci radonu, která je ve skutečnosti vyšší a to za pomoci rovnovážného faktoru (0,4). Tímto přístrojem lze měřit EOAR nejen ve vzduchu, ale i ve vodě a v pevných látkách. Mezi nevýhody LLM 500 lze počítat poměrně vysokou hmotnost (obě jeho části váží dohromady 16 kg) a závislost na síťovém napětí 220 V.



Obr.16.22. Přístroj LLM 500

Na katedře fyziky PdF MU bylo dosud provedeno asi 300 různých měření koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů. Výsledky asi poloviny z nich jsou uvedeny v práci [ 4 ]. Týkají se oblasti kolem Dolní Rožinky, známé těžbou uranové rudy a byla prováděna ve školách (viz Tab.3). Jak plyne z této tabulky, byla maximální hodnota EOAR naměřena v ZŠ ve Žďárci ( 578 Bq.m<sup>-3</sup>). Po naměření této aktivity jsme vyvětrali celou místnost po dobu 10 min a hodnota EOAR klesla na 87 Bq.m<sup>-3</sup>, což potvrzuje známý fakt, že jedním ze způsobů snížení škodlivých účinků radonu a jeho dceřinných produktů je větrání. Vysokou hodnotu EOAR ve třídě lze vysvětlit tím, že celý objekt se nachází na podloží se zvýšenou radioaktivitou a dá se tedy předpokládat, že půdní vzduch je nasycen radonem. Navíc se jedná o nepodsklepený objekt, který není nijak speciálně zabezpečen proti vnikání radonu.

Dalších přibližně 50 měření bylo prováděno v jihozápadní části Českomoravské vysočiny, která se rovněž nachází na podloží se zvýšeným výskytem radioaktivních hornin – okolí Dačic . Všechna měření byla prováděna v nevětraných sklepních místnostech domů v 6 vesnicích. Průměrná hodnota naměřené EOAR závisela dosti ostře na kvalitě podloží. Bylo-li podloží žulové, naměřili jsme hodnoty EOAR v mezích 800 – 1500 Bq.m<sup>-3</sup>. Pro rulové podloží to bylo 500 – 950 Bq.m<sup>-3</sup> a největší hodnoty byly naměřeny ve vesničce Šach, nacházející se na rozhraní (geologickém zlomu) mezi rulou a žulou (cca 3000 Bq.m<sup>-3</sup>).

Naše měření je třeba chápat jako měření předběžná a kvalitativní. Možnosti měření pomocí LLM 500 jsou však mnohem širší, od měření koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů ve vodě a pevných látkách, ve srážkové vodě a půdním vzduchu, až po proměřování poločasu rozpadu čistých radioaktivních látek. To vše je námětem k jeho dalšímu využití.

## Seznam použité a k dalšímu studiu doporučené literatury:

CALLISTER, W.D.: *Science and Engineering. An Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.

ASKELAND, D.R.: *The Science and Engineering of Materials*. Chapman & Hall, 1996.

GROOVER, M.P.: *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.

ŠESTÁK, J., STRNAD, Z., TŘÍSKA, A. a kol.: *Speciální technologie a materiály*. Academia Praha 1993.

POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*. PC-DIR spol s.r.o, Brno 1994.

RABINOWICZ, E.: *Friction and Wear of Materials*. John Wiley & Sons, Inc., 1995

OHANIAN, H.C.: *Physics*. W.W.Norton & Company 1989.

SERWAY, R.A.: *Physics*. Saunders Coll. Publishing. 1996.

BROŽ, J. a kol.: *Základy fyzikálních měření I – III*. SPN Praha, 1967.

SODOMKA, L., FIALA, J.: *Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi 1 a 2*. ADHESIV Liberec 2004.

PLUHAŘ, J. a kol.: *Nauka o materiálech*. SNTL / ALFA 1989.