



GYMNÁZIUM F. X. ŠALDY

PŘEDMĚTOVÁ KOMISE FYSIKY

Struktura a vlastnosti pevných látek

Poznámky & ilustrace

Gymnázium F. X. Šaldy • Honsoft
2005 • Verze 2.0

PŘEDZNAMENÁNÍ

Tento text slouží jako pomocný, faktografický text k výuce fyziky v gymnáziu. Nelze jej považovat za učebnici k samostatnému studiu nebo za jediný zdroj informací, se kterým má student pracovat.

Fyzika pevných látek je zajímavým oborem, v němž se otevírá mnoho otázek k samostatnému přemýšlení; vedle toho je zde mnoho údajů a vzorců, které je potřeba se naučit. Vyučující se domnívá, že vyučovací hodiny je lépe věnovat spíše řešení problémů než obkreslování obrázků krystalografických soustav. Proto jsou zde takovéto obrázky a základní poznámky shrnuty; studenti budou moci *méně psát a více přemýšlet*.

Problémy, doplňkové otázky a příklady nejsou součástí tohoto textu; v hodinách jsou zadávány jinak. Ve vyučovacích hodinách je probírané učivo (oproti tomuto textu) přibližováno dále 3D modely a exponáty. Informace doplňkového charakteru jsou psány menším typem písma.

Tento faktografický text nepřináší (ostatně ani přinášet nemůže) pranic originálního. Jde o kompilaci několika pramenů uzpůsobenou studentům gymnázia; seznam těchto pramenů je připojen v závěru. Tam je také přehled zdrojů použitých ilustrací.

Hned v úvodu je nutno poznamenat, že text se věnuje pouze stavbě a mechanickým vlastnostem pevných látek. Vlastnosti elektrické a optické budou popsány v učebních textech z dalších fyzikálních oborů.

Laskavý čtenář promine „typografickou nejednotnost“ způsobenou zejména autorovou leností napsat i první část textu v TEXu; předpokládalo by to převod mnoha obrázků do formátu eps, popř. jejich (novou) tvorbu Metafontem.

Toto je první, „pracovní“ verze textu; prosím čtenáře, aby autora upozornili na nalezené chyby.

-jvk-

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK

Pevné látky nemění samovolně tvar, tzn. že **tvar zachovávají**, nepůsobí-li vnější síla. (Pro srovnání: kapaliny zachovávají pouze objem, plyny rozpínají se do celého prostoru.)

Měrná skupenská tepla varu látek jsou mnohem větší než jejich měrná skupenská tepla tání, což znamená, že rozrušení krystalové struktury a přechod do kapaliny vyžaduje méně energie než je třeba k varu (je menší rozdíl v silovém působení mezi částicemi kapaliny a pevné látky než mezi částicemi kapaliny a plynu; kapaliny se tak ve struktuře více podobají pevným látkám, ačkoliv v otázkách dynamiky se kapaliny podobají více plynům – jejich společná vlastnost je tekutost, společný název: tekutiny).

Závislost vlastnosti pevné látky na směru:

izotropie – ve všech směrech stejné vlastnosti (s řečtiny: ισος – stejný, ό τροπος – směr či způsob),

anizotropie – vlastnosti závisí na směru, v jednom směru vlastnosti výrazně odlišné od jiného. Příklady vlastností: lámavost (slída se v jednom směru snadno rozdělí na plátky, ale tyto plátky je velmi obtížné rozdělít), šíření světla (různé rychlosti v různých směrech), elektrický odpor, polarizace světla.

Poznámka o symetrii

Říkáme, že geometrický útvar je symetrický, jestliže určitým zobrazením (otočením, zrcadlením) přejde sám v sebe. Vyšší symetrii má ten útvar, pro nějž takových operací existuje více. Příklady: Koule přejde sama v sebe otočením o libovolný úhel kolem libovolné osy procházející středem, válec libovolným otočením kolem jediné osy procházející středem podstav, n -boký hranol otočením kolem jedné osy o úhel $360^\circ/n$. (Koule má vyšší symetrii než válec a válec má vyšší symetrii než hranol.) Symetrie hrají velmi důležitou roli v klasifikaci krystalů.

1. Krystalické látky

- mají pravidelné uspořádání částic (atomů, molekul)
- vytvářejí krystaly; **krystal** (z řečtiny: ό κρυσταλλος – led) – tuhá látka ve tvaru mnohostěnu, který má určitou souměrnost

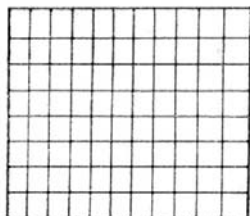
Základní typy krystalických látek:

a) monokrystalické látky (monokrystaly) (z řeč. μονος – jediný)

- periodicky se opakuje uspořádání v celém krystalu (dalekosahové uspořádání) – viz OBR. 1
- zpravidla anizotropní
- sůl NaCl, křemen SiO₂, diamant, polovodiče Si, Ge, uměle vyrobené monokrystaly (rubín)

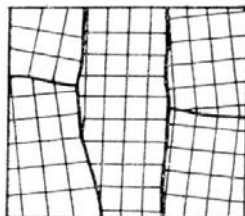
b) polykrystalické látky (polykrystaly)

- tvořeny drobnými zrny o velikosti 10 μm až několik mm, v zrnu částice uspořádány pravidelně, ale vzájemné polohy zrn nahodilé (krátkodosahové uspořádání) – viz OBR. 2
- zpravidla izotropní
- kovy, zeminy, jíly



dokonalý krystal

OBR. 1



mozaikový krystal



polykrystal

OBR. 2

Podsystemy krystalů jsou krystalová mřížka, elektrony.

Vlastnosti určené

- a) **mřížkou**: hustota, anizotropie, růst, mechanické a tepelné vlastnosti, šíření akustických vln,
- b) **elektrony**: vazby v krystalu, optické, elektrické a magnetické vlastnosti krystalů,
- c) **vzájemným působením** mřížky a elektronů: supravodivost, feromagnetismus.

2. Amorfni látky

Patří mezi pevné látky, neboť nemění samovolně tvar; nemají žádné krystaly. Struktura podobná struktuře kapalin; lze říci, že amorfni látky jsou vlastně kapaliny o obrovské viskozitě. (Název z řec. ή μορφη – tvar).

Částice nejsou v makroměřítku pravidelně uspořádány; jsou uspořádány pouze v mikroměřítku, tzn. na vzdálenosti řádově 10^{-8} m (je to energeticky výhodnější) – krátkodosahové uspořádání.

Nemají pevnou teplotu tání a tuhnutí (jde o jisté rozmezí teplot).

Příklady: skla, pryskyřice, asfalt.

Polymery – mají zvláštní strukturu dokonce bez krátkodosahového uspořádání: dlouhé řetězce molekul, stočené do klubek, všelijak zprohýbané (celulosa, kaučuk, bavlna, bílkoviny, celofán, PVC).

Některé látky se vyskytují jako krystalické i jako amorfni: např. oxid boritý. (Krystalický vytváří šestiúhelníková uskupení, amorfni existuje ve sklovité podobě.)

Historické milníky fyziky pevných látek

1611 Johannes Kepler (1571–1630) – pozorování sněhových vloček, hypotézy o příčinách šestihraného tvaru

1669 Niels Stensen (1638–1686) – zjištění, že plochy krystalů dané látky svírají vždy stejné úhly

1690 Christian Huygens (1629–1695) – hypotéza: krystal lze sestavit opakováním identických bloků

1830 Johann Friedrich Christian Hessel (1796–1872) – rozřídění krystalů do krystalografických tříd

1850 Auguste Bravais (1811–1863) – odvození 14 prostorových mřížek

1912 Max von Laue (1878–1960) – difrakce rentgenového záření, pozorování krystalů

2. pol. 20. stol. - užití polovodičů, rozvoj mikroelektroniky

POPIS KRYSTALU

Popis krystalu je možný pomocí čtyř pojmů:

- **geometrická mřížka** – myšlenkový model, soustava bodů v prostoru,
- **hmotná báze** – jeden nebo několik atomů v jisté poloze vzhledem k uzlu geometrické mřížky,
- **ideální krystalová mřížka** = geometrická mříž + hmotná báze,
- **reálná krystalová mřížka** – počítá se s poruchami, konečností mříže, pohybem částic.

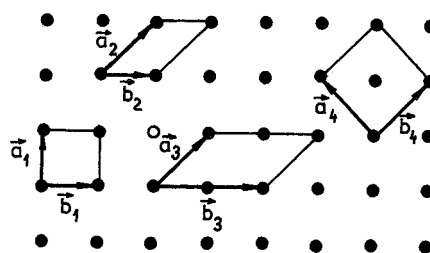
Geometrická mřížka

- geometrická (tedy abstraktní) konstrukce, „věšák“, na který věšíme opakující se motiv, hmotnou bázi
- nekonečně velká, naprosto pravidelná
- soustava bodů v prostoru: zvolíme jeden výchozí bod, k němu nekonečně mnoho dalších bodů rozložených podle jistého pravidla – **mřížkové body**

Poloha každého mřížkového bodu je určena vektorem \mathbf{r} , který spojuje tento bod s výchozím bodem:

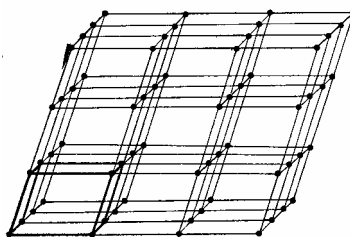
$$\mathbf{r} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c},$$

m, n, p jsou celá čísla. Ukázka několika způsobů volby vektorů (pro přehlednost jen v rovině):



OBR. 3

Lze říci, že rovinná mřížka vznikne neustálým posouváním základního geometrického útvaru (např. čtverce, kosočtverce) popsaného uvedenými vektory a úhly, které tyto vektory svírají; nekonečně mnoho takových útvarů se naskládá „těsně vedle sebe“ ze všech stran.
Geometrická mřížka krystalu je ovšem trojrozměrná; pak vedle sebe skládáme rovnoběžnostěny (např. krychle) – **elementární buňky** krystalové mřížky (OBR. 4).



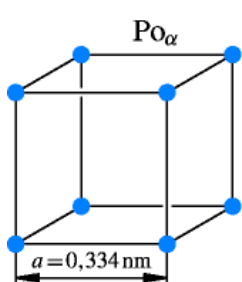
OBR. 4

Tvar mřížky závisí na velikostech vektorů a , b , c a na úhlech, které tyto vektory svírají. Obvykle se jako α označuje úhel mezi vektory \mathbf{b} , \mathbf{c} , β je mezi \mathbf{a} , \mathbf{c} a γ je mezi \mathbf{a} , \mathbf{b} . Poměry délek a úhly určují některou ze 7 krystalografických soustav (viz dále).

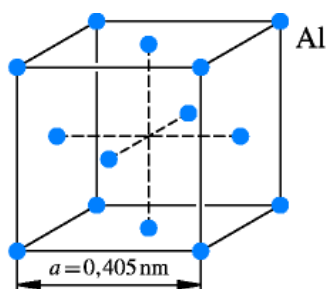
Geometrická mřížka je sestavena z buněk. Připadá-li na jednu buňku 1 mřížkový bod, nazývá se tato buňka **primitivní buňka**. (V rozích krychle je 8 mřížkových bodů, přitom každý z nich zároveň náleží 8 buňkám. Proto na jednu buňku připadá 1 mřížkový bod.)

Pro popis symetrie a dalších vlastností krystalů jsou vhodné i ty elementární buňky, které mají více než 1 mřížkový bod – **centrované elementární buňky**. Jejich typy jsou v následující tabulce, obrázky následují.

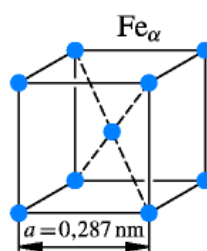
Název	Značka	Počet mřížkových bodů na buňku	Výpočet	Obrázek
primitivní	P	1	$8 \cdot 1/8$	OBR. 5
plošně centrovaná	F	4	$8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2$	OBR. 6
prostorově centrovaná	I	2	$8 \cdot 1/8 + 1$	OBR. 7
bazálně centrovaná	C	2	$8 \cdot 1/8 + 2 \cdot 1/2$	OBR. 8



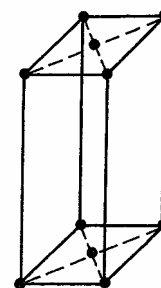
a)
OBR. 5



b)
OBR. 6



c)
OBR. 7

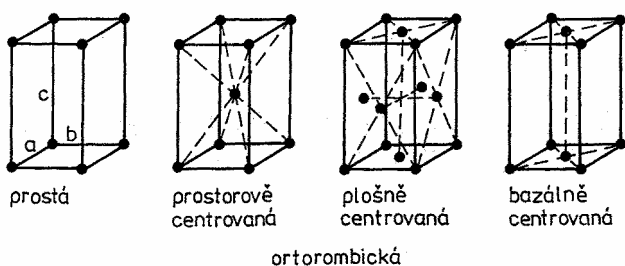
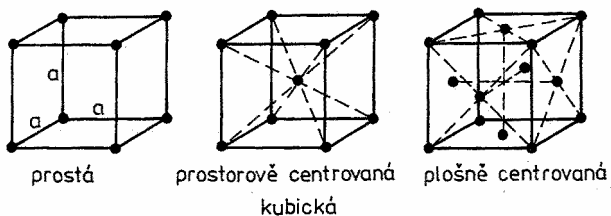
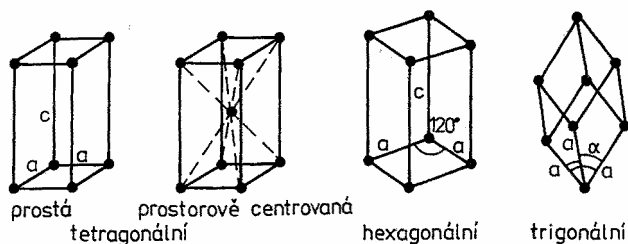
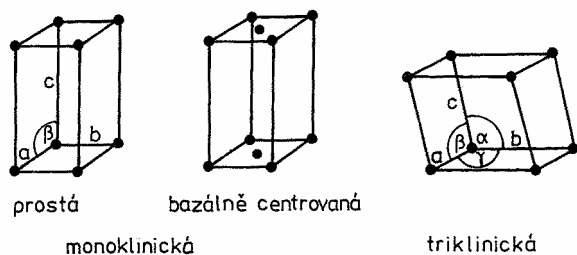


OBR. 8

7 krystalografických soustav & 14 mřížek Bravais

Auguste Bravais (1811–1863) ukázal, že všechny možné prostorové mřížky lze popsat pomocí 14 základních typů. Uvedeme je nyní podle jejich rozdělení do krystalografických soustav.

Název	Popis	Mřížky	Počet	Příklady
MONOKLINICKÁ JEDNOKLONNÁ	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$ $a \neq b \neq c$	P, C	2	sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, S- β
TRIKLINICKÁ TROJKLONNÁ	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$ $a \neq b \neq c$	P	1	modrá skalice $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
TETRAGONÁLNÍ ČTVEREČNÁ	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a = b \neq c$	P, I	2	bílý Sn- β , TiO_2
HEXAGONÁLNÍ ŠESTEREČNÁ	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ $a = b \neq c$	P	1	Zn, Cd, Mg, Ti, beryl
TRIGONÁLNÍ ROMBOEDRICKÁ KLENCOVÁ	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $a = b = c$	P	1	As, Sb, Bi
KUBICKÁ KRYCHLOVÁ	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a = b = c$	P, I, F	3	Cu, Au, Ag, Fe, NaCl
ORTOROMBICKÁ KOSOČTVEREČNÁ	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a \neq b \neq c$	P, C, I, F	4	Ga, S- α , topas



Poznámky

- Bylo by možné zvolit jiných 14 základních typů a vytvořit ekvivalentní popis; uvedené typy se však užívají v praxi.
- Kroužky v obrázcích neznačí atomy, ale pouze mřížkové body.

Dodatek pro kubickou (krychlovou) soustavu:

Speciální značení centrovaných mřížek:
P = sc, I = bcc, F = fcc.

Mřížková konstanta – délka hrany krychle.

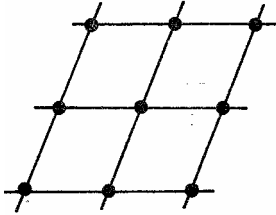
Hmotná báze

Hmotná báze je tvořena atomem nebo několika atomy; „zavěšuje“ se na geometrickou mřížku.

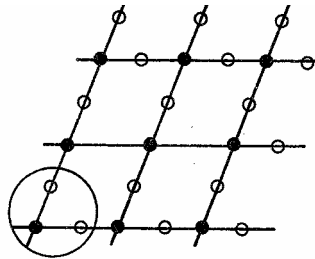
Je-li báze tvořena jediným atomem, pak se umístí zpravidla přímo do mřížkového bodu (OBR. 10); dvouatomová báze se umístí např. jedním atomem do mřížkového bodu, druhý je „mezi“ mřížkovými body (OBR. 11). Počet atomů v bázi není nijak omezen, v některých polymerech jsou jich i tisíce.

Spojením geometrické mřížky a hmotné báze vzniká **ideální krystalová mříž**; mříž nekonečně velká a bez jakýchkoliv poruch.

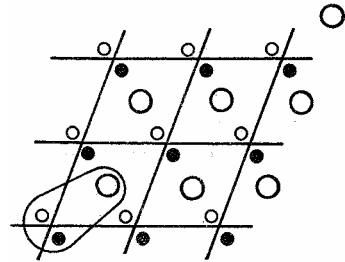
Je zřejmé, že na touž mřížku je možno umístit různé báze; vzniknou tak jiné krystaly (viz OBR. 10–12). Podobně touž bázi (stejný atom, např. atom C) můžeme umístit do různých mřížek, takto vzniklé látky mívají velmi odlišné vlastnosti (viz např. diamant a grafit).



OBR. 10



OBR. 11



OBR. 12

PORUCHY KRYSTALOVÉ MŘÍŽE

Reálná krystalová mříž (narozdíl od ideální) není nekonečná a má poruchy. Poruchy jsou přitom velmi důležité, jsou příčinou řady jevů. Poruchy ovlivňují zbarvení krystalů, vodivost polovodičů, bývají příčinou luminiscence.

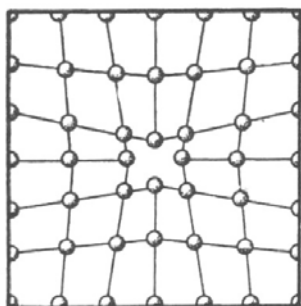
Relativní počet poruch je velmi různý: např. v monokrystalu křemíku připadá 1 porucha na 10^6 částic ve „správných“ polohách, v některých slitinách je počet poruch s počtem částic ve „správných“ polohách srovnatelný.

Rozlišujeme dva základní typy poruch: bodové a čarové.

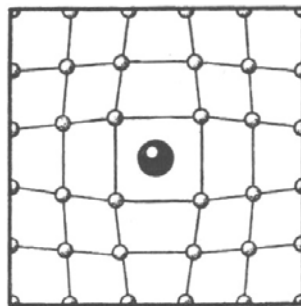
1. Bodové poruchy

vakance – chybí atom v místě, které by podle IKM mělo být obsazeno; příčinou této poruchy je kmitavý pohyb částic, popř. ozáření neutrony či elektrony (OBR. 13)

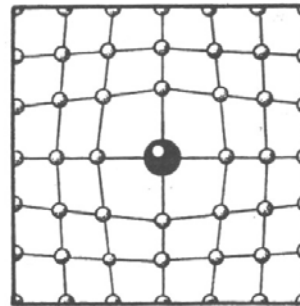
intersticiální poloha – částice leží mimo bod IKM (OBR. 14)



OBR. 13



OBR. 14



OBR. 15

Podle dalšího výskytu částice, která „vypadla“ z místa mřížky a vytvořila tak vakanci, se rozdělují další typy poruch:

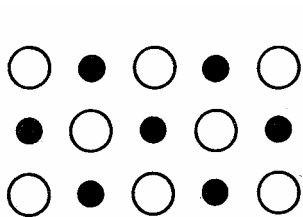
Schottkyho porucha = vakance + částice na povrchu (OBR. 17)

Frenkelova porucha = vakance + částice v intersticiální poloze (OBR. 18)

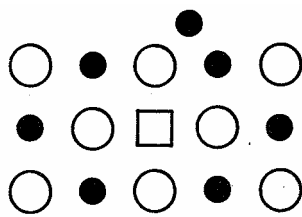
Relativní počet poruch n/N v krystalu závisí na termodynamické teplotě podle vztahu

$$\frac{n}{N} = e^{-\varepsilon/kT},$$

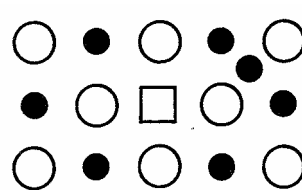
kde ε je energie potřebná k vytvoření jedné vakance. Čím více poruch v krystalu je, tím větší má soustava entropii (neboť je zde větší neuspořádanost).



OBR. 16



OBR. 17



OBR. 18

příměsi – „cizí“ částice v krystalu (OBR. 15); tyto částice

- leží v intersticiálních polohách – příčina absorpce H, C, O, N v kovech, C v Fe (různé druhy oceli)
- nahrazují atomy mříže – atomy B, P nahrazují Si či Ge v polovodičích; umělé monokrystaly – v bezbarvém a průhledném Al_2O_3 se 0,5 % iontů Al^{3+} nahradí ionty chromu Cr^{3+} , tím vznikne tmavočervený rubín (lasery)

2. Čarové poruchy – dislokace

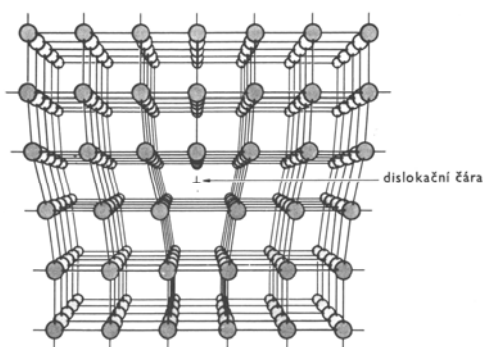
Lze popsat pomocí dvou základních typů: hranové a šroubové dislokace:

Hranová dislokace

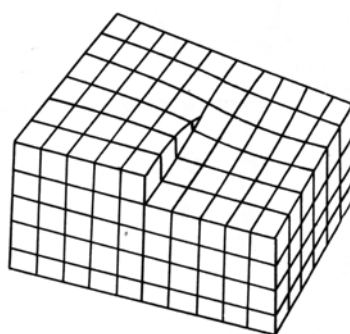
- vznikne odstraněním části jedné vrstvy atomů a přizpůsobením se celého útvaru této poruše (OBR. 19)
- dislokační čára – prochází křížkem, kolmá na rovinu papíru
- při deformaci se přidaná vrstva pohybuje, dosáhne-li kraje, zmizí; zůstává trvalá deformace – přitom se dislokační čára pohybuje (jako vlna na koberci) kolmo na směr působících sil (OBR. 21)

Šroubová dislokace

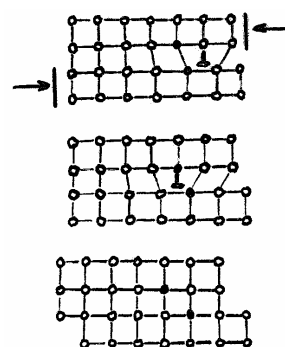
- vznikne řezem krystalu a následným posunutím jedné strany vůči straně druhé (OBR. 20)
- krystalové roviny se deformují do šroubových ploch
- dislokační čára rovnoběžná se silami



OBR. 19



OBR. 20



OBR. 21

Poznámky

1. Z dvou základních typů se skládají jiné poruchy.
2. Díky dislokacím pevné látky mají jen 0,1 % pevnosti, kterou by měly mít na základě IKM.
3. Dislokace vysvětlují deformace pevných látek (viz dále).
4. V krystalu bývá nejméně 10^6 dislokací na m^2 , v deformovaných krystalech až 10^{16} dislokací na m^2 .

VAZBY V KRYSTALECH

Krystal drží pohromadě převážně přitažlivé elektrostatické vzájemné působení:

- Kladné ionty jsou ve velkých vzdálenostech, aby elektrostatické odpuzování bylo minimální.
- Vzdálenosti valenčních elektronů jsou co největší.
- Valenční elektrony musí být blízko kladných iontů, aby elektrostatické přitahování bylo maximální.

Iontové krystaly

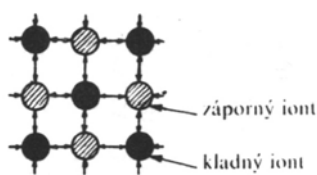
- **iontová (heteropolární) vazba:** přitažlivé elektrostatické síly mezi kladnými a zápornými ionty převažují nad odpuzivými silami mezi ionty stejného náboje (OBR. 22)
- vysoké prostorové zaplnění ve všech směrech
- pevná vazba (látky jsou tvrdé), není narušována tepelným pohybem částic (vysoký bod tání)
- krystaly rozpustné v polárních kapalinách (např. ve vodě) – elektrolytická disociace (štěpení na ionty vlivem polárních molekul rozpouštědla)
- za běžných teplot izolanty, za vysokých vodiče
- křehké (uspořádání atomů zamezuje klouzání vrstev, na rozdíl od kujných kovů)
- příklady: NaCl, CsCl, KBr, alkalické halogenidy

Kovaletní (atomový) krystal

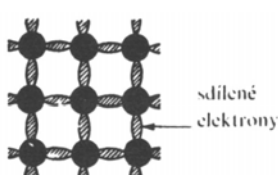
- **kovalentní (homeopolární, chemická) vazba:** 2 valenční elektrony jsou společně sdíleny dvěma atomy krystalové mřížky (dvojice elektronů s opačnými spiny: $\uparrow\downarrow$)
- směrová vazba – míří k druhému atomu, s nímž sdílí elektronový pár; počet vazeb dán počtem valenčních elektronů (OBR. 23)
- elektronový pár v těsné blízkosti atomů – vysoké prostorové zaplnění
- velmi pevná vazba (tvrdost, vysoký bod tání)
- nerozpustné látky; izolanty neb polovodiče
- příklady: Ge, Si, diamant

Kovový krystal

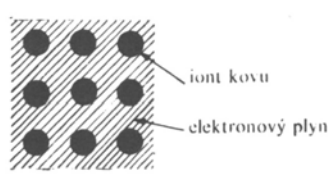
- **kovová vazba:** valenční elektrony jsou společné pro všechny atomy krystalu, volně se pohybují, vytvářejí elektronový plyn; interakce plynu s kladnými ionty vede k velké soudržné síle (OBR. 24)
- poměrně pevná, narušována tepelným pohybem
- vysoká elektrická a tepelné vodivost, lesk, neprůhlednost
- kujnost, tažnost (vrstvy lze po sobě posouvat)
- příklady: Cu, Al, Fe, W



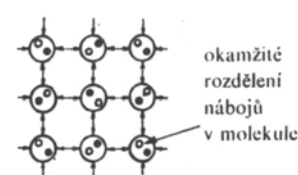
OBR. 22



OBR. 23



OBR. 24



OBR. 25

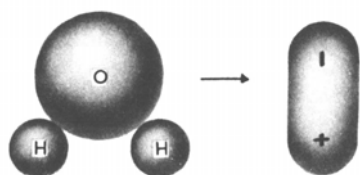
Molekulární krystal

Existují dva typy molekul:

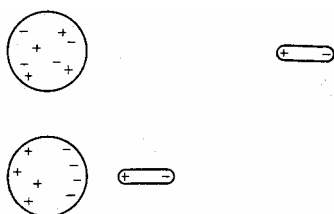
- a) **polární** – mají „póly“, kladně resp. záporně nabitou část (jako celek je molekula zpravidla elektricky neutrální), chovají se jako elektrické dipóly (např. molekula vody – část u O má záporný náboj, u H kladný – viz OBR. 26),
- b) **apolární** – nemají nabitě části, ale v přítomnosti vnějšího náboje se v nich indukují oblasti kladného resp. záporného náboje, potom se také chovají jako elektrické dipóly (viz OBR. 27).

Dipóly se k sobě řadí (OBR. 28) konci opačné polarity, jsou přitahovány, vzniká **van der Waalsova vazba**.

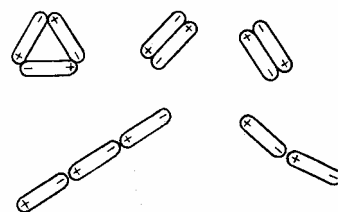
- slabá vazba – snadno narušována, nízká teplota tání
- prakticky ve všech látkách (I, Cl, O, H), typické pro inertní prvky (Ne), organické látky



OBR. 26



OBR. 27



OBR. 28

Vazba vodíkovými mosty

- ion vodíku – proton bez obalu – spojuje dva atomy v blízkosti – „vodíkový most“
- silnější než van de Waalsovy vazby, slabší než iontové nebo kovalentní vazby
- snadno narušena tepelným pohybem, nižší teplota tání
- příklady: led, HF

V krystalech je často více typů vazeb. Příklad: V grafitu jsou atomy uhlíku pevně vázány kovalentními vazbami do sítě pravidelných šestiúhelníků, mezi jednotlivými vrstvami je slabá van der Waalsova vazba. Proto se grafit dobře otírá. (Vrstevnatý krystal.)

KAPALNÉ KRYSTALY

Kapalné krystalické látky jsou známy již od konce minulého století. Poprvé na ně upozornil rakouský botanik Reinitzer v r. 1888, který u syntetizovaného cholesterylbenzoátu objevil dvě teploty tání. Při teplotě 145 °C dostal kalnou kapalinu, která při teplotě 179 °C znovu zprůsvitněla. Zkoumaný vzorek byl poslán německému fyzikovi Lehmannovi, který označil zakalené oblasti jako nový stav, který jeví optické vlastnosti krystalu a nazval ho stavem kapalně krystalickým s velkou optickou anizotropií. Je to nový termodynamický stav, který se liší od stavu kapalného svými elektrickými, magnetickými a optickými vlastnostmi. V prvním desetiletí 20. století bylo syntetizováno 250 kapalně krystalických látek, nyní je známo více jak 10 000 kapalných krystalů.

Obecně rozlišujeme termotropní a lyotropní krystaly.

Termotropní kapalné krystaly

Termotropní kapalné krystaly přecházejí z krystalické fáze do fáze izotropní přes mezofáze kapalně krystalické **tepelnou výměnou**. Zahřejeme-li pevný krystal **mezogenu** (látky schopné vytvářet kapalný krystal) na určitou teplotu, mění se jeho struktura. Pevný krystal přechází do **smektické fáze**, ve které jsou molekuly uspořádány v řadách, a to poměrně dobře symetricky. Z fáze smektické přechází látka do **nematické fáze**, v níž molekuly jsou seřazeny vedle sebe tak, že jejich dlouhé osy jsou rovnoběžné a těžiště jsou volně pohyblivá. Uspořádání je méně symetrické než u smektické fáze. Při dalším zahřívání dostáváme izotropní kapalinu. Symbolicky zapsáno:

pevný krystal → smektická fáze → nematická fáze → izotropní kapalina

a) **Kapalné krystaly smektické** (OBR. 29) mají strukturu rovnoběžných vrstev. V nich jsou molekuly uspořádány v řadách. Dlouhé osy molekul svírají různě velké úhly s rovinou vrstvy. Účinkem vnějších sil se vrstvy volně po sobě klouzají. Můžeme říci, že se chovají jako dvourozměrná kapalina. Smechtické kapalné krystaly tvoří na rovném a čistém povrchu hranaté kapky s terasovitou strukturou. Výška stupínku terasy je úměrná tloušťce smektické vrstvy. Smechtické kapalné krystaly různě pohlcují světlo v závislosti na směru vektoru elektrické intenzity prostupujícího světla vůči směru os molekul. Při dopadu bílého světla vidíme pozorovaný vzorek duhově zbarvený.

Typickým příkladem je ethylový ether *n*-azoxybenzoové kyseliny. Pevné krystalky této látky začínají tát při teplotě 114 °C a při teplotě 120 °C již vytvářejí izotropní kapalinu. Když takto vzniklou kapalinu začneme ochlazovat, vznikají zárodky kapalně krystalické fáze – tyčky. Pod mikroskopem při zkřížených polaroidech vidíme světlé tyčky, což svědčí o optické anizotropii.

b) **Kapalné krystaly nematické** (OBR. 30; z řec. νημα – nit) mají molekuly seřazeny vedle sebe tak, že jejich dlouhé osy jsou rovnoběžné a těžiště jsou volně pohyblivá. Struktura není vrstevnatá, krystaly mají vláknovitý tvar. Místa, kde se mění směr molekul při pozorování v mikroskopu v bílém světle, jeví se jako nitě – vlákna. Nematické kapalné krystaly jsou silně dvojlomné a rovněž různě pohlcují světlo v závislosti na směru vektoru elektrické intenzity.

Typickým kapalným krystalem nematického druhu je *n*-azoxyanizol. Oblast existence meofáze je od teploty 116 °C do teploty 136 °C. Zvláštní druh nematické fáze tvoří deriváty **cholesterolu**. Molekuly jsou uspořádány ve vrstvách, ale vrstvy jsou seřazeny tak, že směr dlouhé osy tvoří šroubovici s výškou závitů řádově 300 nm. **Cholesterické kapalné krystaly** se vyznačují vysokou optickou aktivitou, tzn. schopností stáčet rovinu jimi procházejícího polarizovaného světla. Typickým příkladem cholesterického kapalného krystalu je cholesterylcinnamat nebo cholesterylpropionat s teplotním intervalem mezofáze od 102 °C do 116 °C.

Lyotropní kapalné krystaly

Jsou to krystaly vzniklé při rozpouštění látek ve vodě a jiných kapalinách (vodný roztok mýdla, roztoky virů tabákové mozaiky a některých polypeptidů). Některé organické látky nerozpustné ve vodě jsou dobře rozpustné ve vodných roztocích mýdla, přičemž dochází ke tvorbě tzv. mielionových forem. Jsou to trubice s dvojitou vrstvou molekul mýdla rozdělených vrstvou vody. Uvnitř trubic je lyotropní kapalný krystal.

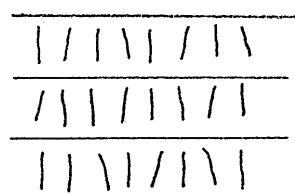
Užití

Výroba polaroidů – tenká vrstva nematického kapalného krystalu se umístí mezi dvěma orientovanými průsvitnými destičkami. Po určité době se rozpouštědlo odpaří a zůstane tenká vrstva orientovaných dichroických molekul, tj. polaroid.

Konvertory – měniče infračerveného záření na viditelné záření. Tímto způsobem se pro oko zviditelňuje např. paprsek plynového laseru.

Indikátor chemických látek – cholesterické kapalné krystaly jsou také citlivé na přítomnost par různých chemických látek. S jejich pomocí se dá stanovit přítomnost chemické látky v koncentraci 0,000 1 %.

Elektrooptické vlastnosti kapalných krystalů – aplikace v elektronice a sdělovací technice. **Displeje** jsou založeny na jevu dynamického rozptylu světla na kapalných krystalech. Jev spočívá v tom, že při vytvoření elektrického pole v kapalném krystalu dochází k turbulencím látky, na nichž se silně rozptyluje dopadající bílé světlo. Místa, kde pole nepůsobí, zůstávají čirá. To dává možnost získat různé obrazce připojením vhodného elektrického pole.



OBR. 29



OBR. 30

DEFORMACE PEVNÉHO TĚLESA

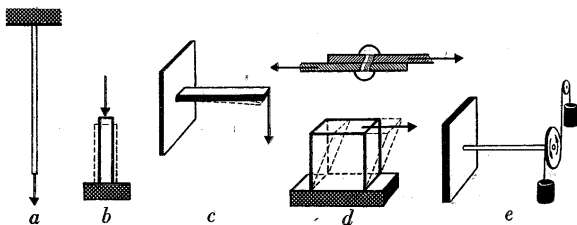
Působíme-li na těleso silou, začne se pohybovat se zrychlením nebo dojde k jeho deformaci. **Deformace tělesa** je změna rozměrů, tvaru nebo objemu tělesa způsobená vnějšími silami.

Pružná (elastická) deformace – deformace, která zmizí, přestanou-li působit vnější síly (např. protahování drátu malou silou).

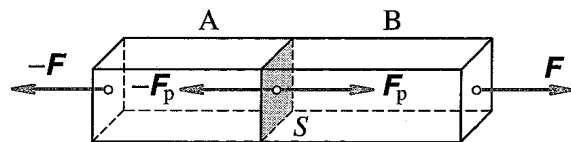
Tvárná (plastická) deformace – deformace, která nezmizí; přetrvává, i když vnější síly přestanou působit (kování, válcování).

Dopružování (elastická hystereze) – deformace zmizí až po určité době, těleso se vrátí do původního stavu až po chvíli.

Podle způsobu, jakým síly na těleso působí, lze popsat **5 základních typů deformací** (viz OBR. 31): a) tahem, b) tlakem, c) ohybem, d) smykem a e) kroucením. V dalším výkladu se budeme zabývat jen pružnými deformacemi. Nebudeme přitom zpravidla přihlížet k jednotlivým atomům (popř. molekulám) těles, ale většinou budeme tělesa při deformaci popisovat jako spojitý celek – **kontinuum**.



OBR. 31



OBR. 32

Deformace tahem

- deformace tahem vzniká, působí-li na těleso ve směru ven z tělesa dvě stejně velké síly; tyto síly \vec{F} a $-\vec{F}$ přitom působí na jedné vektorové přímce a mají opačný směr (viz OBR. 32)
- působením sil se zvětšují vzdálenosti mezi částicemi látek \Rightarrow zvětšují se přitažlivé síly \Rightarrow vznikají **síly pružnosti**

a) Kolmý řez tělesem

Rozdělme těleso kolmým řezem. Působením vnějších sil \vec{F} a $-\vec{F}$ dochází ke vzdalování částic části A tělesa od částic části B tělesa. Proto na pravou stěnu části A začne působit výsledná síla pružnosti \vec{F}_p vyvolaná působením částic ležících na levé stěně části B. Podle zákona akce a reakce stejně velkou silou opačného směru působí část A na část B. Síly pružnosti zabraňují dalšímu prodlužování kvádru; v jistém okamžiku nastane rovnováha, kdy $\vec{F} = \vec{F}_p$; přitom je v tělese jakýsi **stav napjatosti**. Tento stav lze popsat veličinou **normálové napětí** σ_n :

$$\sigma_n = \frac{F_p}{S};$$

F_p je velikost síly pružnosti působící kolmo na plochu příčného řezu o obsahu S . Jednotkou normálového napětí je **pascal** (Pa).

b) Šikmý řez tělesem

Je-li průřez (= obsah kolmého řezu) tyče S , pak obsah řezu „pod úhlem α “ (viz OBR. 33) je $S' = S / \cos \alpha$. Sílu F působící na šikmý řez můžeme rozložit na dvě složky:

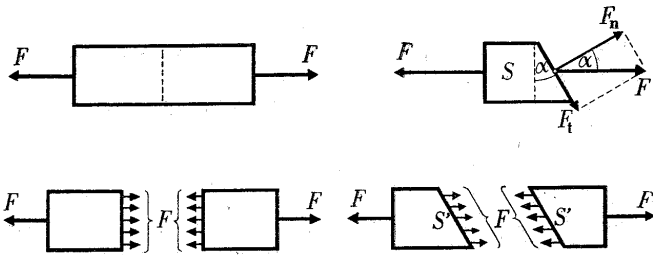
normálová (kolmá) složka \vec{F}_n – složka kolmá na daný řez, $F_n = F \cos \alpha$,

tangenciální (tečná) složka \vec{F}_t – složka ležící v řezu, $F_t = F \sin \alpha$.

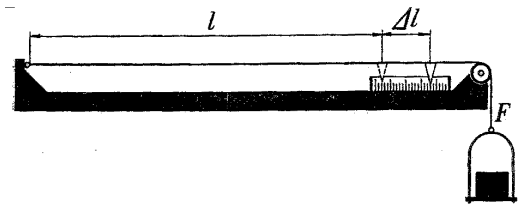
Dělíme-li tyto složky plochou řezu S' , dostaneme

normálové napětí $\sigma_n = \frac{F_n}{S'} = \frac{F_n}{S} \cos \alpha = \frac{F}{S} \cos^2 \alpha$,

tangenciální napětí $\sigma_t = \frac{F_t}{S'} = \frac{F_t}{S} \cos \alpha = \frac{F}{S} \sin \alpha \cos \alpha = \frac{F}{2S} \sin 2\alpha$. (V úpravách bylo užito výše uvedených vztahů, v poslední úpravě navíc goniometrického vzorce $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$.)



OBR. 33



OBR. 34

Předpokládejme, že drát délky l a průřezu S na jednom konci upevníme a na druhém napínáme silou o velikosti F . Délka drátu l se prodlouží o Δl . Toto prodloužení závisí na původní délce drátu, proto se zavádí **relativní podélné prodloužení**

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (1)$$

Experiment (Robert Hooke, 1635–1703, OBR. 34) ukazuje, že **prodloužení** je přímo úměrné původní délce drátu l , velikosti síly F a nepřímo úměrné průřezu drátu S , tedy

$$\Delta l = k \frac{Fl}{S}. \quad (2)$$

Činitel k se nazývá **koeficient (součinitel) protažení**, jeho velikost závisí na vlastnostech materiálu. V praxi se používá spíše jeho převrácená hodnota $E = 1/k$; nazývá se **Youngův modul pružnosti (modul pružnosti v tahu)**. Vztah (2) lze potom psát ve tvaru

$$\Delta l = \frac{1}{E} \frac{Fl}{S} \quad \text{nebo} \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}. \quad (3)$$

S využitím (1) můžeme (3) přepsat:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma_n \quad \text{nebo} \quad \sigma_n = \varepsilon E; \quad (4)$$

toto tvrzení se nazývá **Hookův zákon**. Slovně jej lze vyjádřit takto: Normálové napětí je přímo úměrné relativnímu prodloužení. (Konstantou úměrnosti je E .) Hookův zákon byl zjištěn experimentálně a neplatí zcela obecně; nepopisuje chování např. betonu, litiny, žuly.

Jednotky a fyzikální význam

Relativní prodloužení ε je bezrozměrné, proto pro Youngův modul platí $[E] = \text{Pa}$. Je to konstanta, jejíž hodnotu lze pro daný materiál najít v tabulkách. Např. pro ocel je $E = 220 \text{ GPa}$.

Položíme-li v rovnicích (1) a (4) za $\varepsilon = 1$, potom $\Delta l = l$ a $\sigma_n = E$. Znamená to, že Youngův modul pružnosti je *myšlené* napětí, které by způsobilo prodloužení tělesa o původní délku. (Proč *myšlené* napětí? Jednak by se reálný materiál při tomto napětí zpravidla přetrhl, jednak pro toto napětí již Hookův zákon neplatí, neboť je překročena mez úměrnosti – viz dále.)

Výsledná délka L tělesa je

$$L = l + \Delta l = l\left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right) = l(1 + \varepsilon) = l\left(1 + \frac{\sigma_n}{E}\right). \quad (5)$$

Příčná deformace při tahu

Prodloužení drátu nebo tyče ve směru podélném je doprovázeno zkrácením příčných rozměrů. Je-li původní příčný rozměr D a zkrátí-li se o Δd , pak pro novou délku d platí $d = D - \Delta d$. Definujeme **relativní příčné zkrácení** η vztahem

$$\eta = \frac{\Delta d}{D}. \quad (6)$$

Poissonovo číslo μ je poměr relativního příčného zkrácení ku relativnímu podélnému prodloužení, tedy

$$\mu = \frac{\eta}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta d}{D}}{\frac{\Delta l}{l}}. \quad (7)$$

Poissonova konstanta m se zavádí jako převrácená hodnota Poissonova čísla, $m = 1/\mu$. Ze vztahů (6), (7) a (3) dostáváme další „užitečné“ vzorce:

$$\eta = \frac{\Delta d}{D} = \mu \frac{\Delta l}{l} = \mu \frac{F}{SE} = \mu \frac{\sigma}{E}. \quad (8)$$

Příčný rozměr D se zkrátí na délku d , pro niž platí

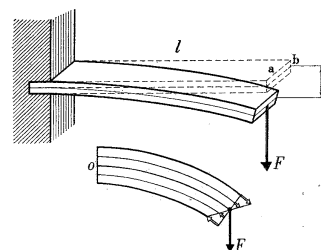
$$d = D - \Delta d = D\left(1 - \frac{\Delta d}{D}\right) = D(1 - \eta) = D\left(1 - \mu \frac{\sigma_n}{E}\right). \quad (9)$$

Deformace v tlaku

Při namáhání v tlaku (OBR. 35) se každé dva sousední průřezy tělesa přibližují. Vztahy popisující deformaci v tlaku jsou analogické vztahům popisujícím deformaci v tahu, ale ve směru působících sil se rozměry zkracují; příčné rozměry se zvětšují. Modul pružnosti v tlaku je pro většinu látek shodný s modulem pružnosti v tahu (výjimky: např. železo, litina).



OBR. 35



OBR. 36

Deformace ohybem

a) Krákorcový nosník

Krákorcový nosník (OBR. 36) je vodorovná tyč, jejíž jeden konec je upevněn, na druhý působí síla \vec{F} svislým směrem. Těžištěm nosníku prochází tzv. **neutrální pásmo** – soubor vláken nosníku, která se jen prohnu, ale nezmění svou délku. Vlákná nad tímto pásmem se deformují tahem, vlákna pod neutrálním pásmem se deformují tlakem.

Průhyb nosníku je dán vztahem

$$y = \frac{4}{E} \frac{l^3}{ab^3} F, \quad (10)$$

kde l je délka, b výška (tj. rozměr *ve* směru působící síly), a šířka (tj. rozměr *kolmý* ke směru působící síly).

b) Obecný vzorec

Obecně pro deformaci ohybem platí vzorec

$$y = \frac{1}{3E} \frac{l^3}{J} F, \quad (11)$$

kde J je moment setrvačnosti průřezu tyče vzhledem k ose kolmé k zatížení. Připomeňme, že (při zvoleném značení) je pro obdélník $J = \frac{1}{12} ab^3$, pro kruh $J = \frac{\pi}{4} r^4$.

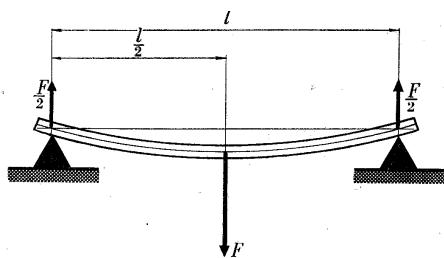
c) Prostý nosník

Prostý nosník (OBR. 37) je tyč podepřená na obou koncích, uprostřed zatížená silou \vec{F} . Vzorec pro průhyb odvodíme z obecného vzorce (11). Představme si nosník podepřený uprostřed, takže deformace je způsobena silou o velikosti $F/2$ působící ve vzdálenosti $l/2$. Dosadíme-li do vzorce (11) místo F výraz $F/2$ a místo l výraz $l/2$, dostaneme po úpravě

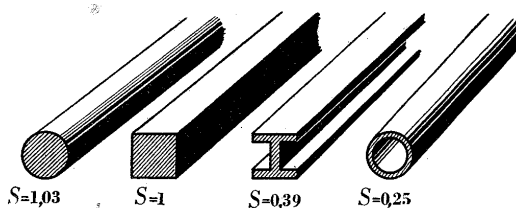
$$y = \frac{1}{48E} \frac{l^3}{J} F. \quad (12)$$

Tvar řezu nosníku

Pevnost při ohýbání závisí nejen na průřezu nosníku, ale i na tvaru. Stejně pevnosti se při různých tvarech řezu dosahuje různou velikostí průřezu (viz OBR. 38). Je patrné, že největší úspory materiálu (při dané pevnosti) se dosáhne volbou tvaru (duté) trubky. (Tento tvar mají brka ptačích per, stébla obilí, trubky na stavbu lešení ...)



OBR. 37



OBR. 38

Deformace smykem

Předpokládejme, že kvádr o rozměrech $a \times b \times c$ je upevněn stěnou o rozměrech $a \times c$ k podložce. V horní podstavě působí síla \vec{F} rovnoběžná s touto plochou. Tím vzniká tečné napětí – **smykové napětí**, jehož velikost je

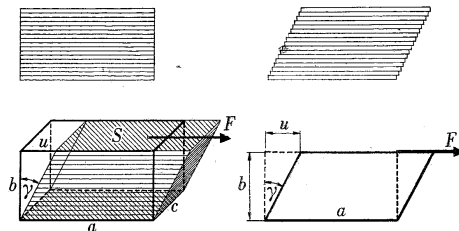
$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{F}{ac}. \quad (13)$$

Vrstvy tělesa se po sobě posouvají – horní vrstva se posune celkem o délku u (viz OBR. 39). Je-li vzdálenost krajních vrstev (= výška tělesa) rovna b , nazýváme výraz u/b **relativní prodloužení** neboli **zkos**. Podle obrázku je $u/b = \operatorname{tg} \gamma$, pro malé úhly platí přibližná rovnost

$$\operatorname{tg} \gamma \doteq \gamma. \quad (14)$$

Hookův zákon pro smyk vyjadřuje, že zkos je úměrný napětí:

$$\frac{u}{b} = k' \sigma_t = k' \frac{F}{ac}. \quad (15)$$



OBR. 39

Konstanta k' (charakteristická pro daný materiál) se nazývá **koeficient smyku**. Jeho převrácenou hodnotu

$$G = \frac{1}{k'} \quad (16)$$

nazýváme **modul pružnosti ve smyku** neboli **modul torze**. Ze vztahů (14), (15) a (16) plyne

$$\gamma \doteq k' \sigma_t = \frac{1}{G} \sigma_t, \quad (17)$$

po vynásobení krajních členů rovnosti číslem G dostáváme přehledný vzorec

$$\sigma_t = G\gamma, \quad (18)$$

který svým tvarem odpovídá Hookovu zákonu pro deformaci tahem (4).

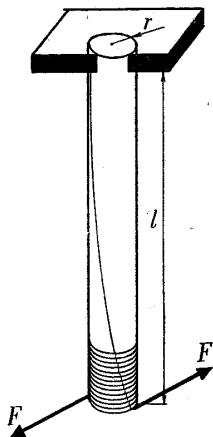
Podobně jako u deformace tahem vysvětleme fyzikální význam modulu pružnosti ve smyku: Položíme-li $\gamma = 1$, dostaneme $G = \sigma_t$. Protože $\gamma = u/b$, znamená to, že modul pružnosti ve smyku je takové *myšlené* tečné napětí, které by způsobilo posunutí horní stěny kvádrů o délku rovnou výšce kvádrů. (Napětí je pouze *myšlené*, neboť při takové deformaci by již Hookův zákon neplatil.)

Deformace kroucením

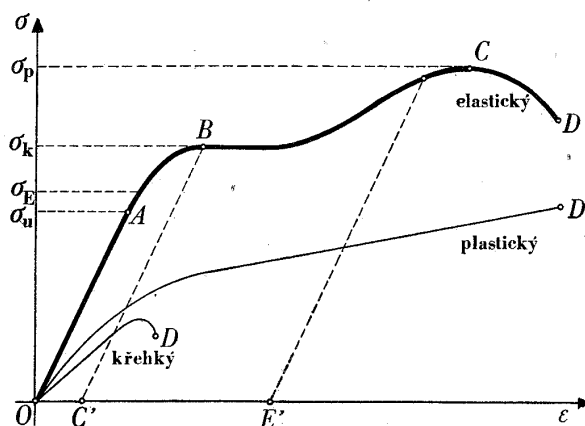
Mějme tyč tvaru válce délky l a poloměru r , která je na jednom konci pevně upevněna, na druhém je kroucena dvojicí sil o momentu M (viz OBR. 40). Lze odvodit (viz např. [Hla71]), že úhel, o který se pootočí průřez na volném konci válcové tyče, udává vztah

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \frac{1}{G} \frac{l}{r^4} M, \quad (19)$$

kde G je modul torze materiálu, z něhož je tyč vyrobena. Podíl $\vartheta = \varphi/l$ se nazývá **poměrné zkroucení** neboli **zkrut**. Jednotkou je rad/m.



OBR. 40



OBR. 41

Elastický diagram

Budeme sledovat průběh protahování tyče (drátu) upnutého do čelisti trhacího stroje v závislosti na napětí. Průběh změn při protahování znázorníme v **elastickém diagramu**, tj. v grafu, kde na svislou osu vynášíme napětí a na vodorovnou osu relativní prodloužení. („Logické a přirozené“ by bylo vynášet veličiny opačně, popsany způsob je však obvyklý.) Výsledný graf je v OBR. 41, který nyní obsáhleji okomentujeme.

Nejprve je relativní prodloužení úměrné napětí, to platí až k jisté hodnotě napětí σ_u , kterou nazýváme **mez úměrnosti**. Tomu odpovídá lineární část křivky od bodu O k bodu A ; platí zde Hookův zákon, jsou to pružné deformace tahem. Přestane-li působit napětí, tyč se zkrátí na původní délku. Zatěžujeme-li dále až do napětí σ_E , dosáhneme tzv. **meze pružnosti**, která se zpravidla neliší mnoho od meze úměrnosti. Mez pružnosti je takové napětí, při kterém ještě nevznikne trvalá deformace. Při namáhání, které překročí mez pružnosti, zůstává již trvalá deformace.

Z křivky vidíme, že relativní podélné prodloužení ϵ je při napětích až do meze pružnosti malé. V bodě B náhle nastává velké prodloužení při konstantním napětí; křivka probíhá téměř vodorovně. Tento jev se nazývá **kluz** nebo **tečení**. Napětí, příslušné bodu B , nazýváme **mez kluzu** nebo **mez průtažnosti** σ_k . Napětí mezi body B a C křivky jsou potřebná např. k tváření kovů zastudena (lisování, tažení).

Dále křivka opět stoupá, což znamená, že má-li se zvětšovat poměrné podélné prodloužení, musí v tyči růst napětí. Křivka stoupá až do bodu C . Fyzikální vlastnosti materiálu se začínají značně měnit, materiál se zpevňuje.

Nakonec se tyč začne náhle v některém řezu rychle zužovat, a při určité hodnotě napětí zvané **mez pevnosti** σ_p se přetrhne (bod D).

Pevností materiálu rozumíme největší napětí, které látka ještě snese, aniž se poškodí. Podle druhů deformací mluvíme o pevnosti v tahu, tlaku, ve smyku atd. **Pružné materiály** jsou takové, u nichž ani poměrně velké napětí nevyvolá trvalou deformaci. Mez pružnosti je u nich poměrně vysoká, např. u oceli je větší než polovina meze pevnosti.

V OBR. 41 je také vyznačena závislost prodloužení na napětí pro materiály plastické a křehké:

Křehké materiály – mají mez pevnosti nižší než mez pružnosti, vůbec nemůže vzniknout trvalá deformace, nesnesou větší změny tvaru. Působením nárazové síly se křehké látky drobí, např. sklo, porcelán, litina.

Tvárné (plastické) materiály – účinkem vnější síly se deformují a podrží deformovaný tvar, nejsou pružné. Přejít mezi pružnými a plastickými látkami tvoří některé barevné kovy (např. měď).

TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST PEVNÝCH TĚLES

Délková teplotní roztažnost

Délková teplotní roztažnost – změna délky těles, jejichž jeden rozměr je výrazně delší než ostatní rozměry (tyč, drát apod.), v závislosti na změně jejich teploty.

Předpokládejme, že tyč o původní délce l_0 při teplotě t_0 se zahřátím o Δt na teplotu t prodlouží o délku Δl na délku l . Platí tedy

$$\Delta t = t - t_0, \quad \Delta l = l - l_0. \quad (20)$$

Experiment ukazuje, že prodloužení je přímo úměrné počáteční délce tyče a přírůstku její teploty:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t. \quad (21)$$

Konstanta α se nazývá **teplotní součinitel délkové roztažnosti**; její hodnoty pro různé látky se udávají v tabulkách. Protože $\alpha = \Delta l / (l_0 \Delta t)$, je $[\alpha] = ^\circ\text{C}^{-1}$ resp. $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ (reciproký kelvin). Součinitel α je mírně závislý na teplotě. (Ve školských výpočtech jej však budeme považovat za konstantní.)

Výsledná délka tyče je dána vztahem

$$l = l_0 + \Delta l = l_0 + \alpha l_0 \Delta t = l_0(1 + \alpha \Delta t) = l_0(1 + \alpha(t - t_0)). \quad (22)$$

Anizotropní látky mají v různých směrech různé součinitele délkové roztažnosti. Dřevo se roztahuje 5 až 25krát více napříč vláknům než podél nich. Průměr bukového trámu roste při zahřívání asi 24krát rychleji než jeho délka.

Objemová teplotní roztažnost

Uvažujme o izotropním kvádru o hranách délky a_0 , b_0 , c_0 při teplotě t_0 . Objem tělesa je tedy $V_0 = a_0 b_0 c_0$. Při zahřátí o teplotu Δt se délky jednotlivých hran prodlouží:

$$a = a_0(1 + \alpha\Delta t), \quad b = b_0(1 + \alpha\Delta t), \quad c = c_0(1 + \alpha\Delta t). \quad (23)$$

Objem tělesa po zahřátí bude

$$V = abc = a_0 b_0 c_0 (1 + \alpha\Delta t)^3 = a_0 b_0 c_0 (1 + 3\alpha\Delta t + 3\alpha^2(\Delta t)^2 + \alpha^3(\Delta t)^3). \quad (24)$$

Poslední dva členy jsou řádově menší než člen $3\alpha\Delta t$, můžeme je proto zanedbat. Dále je zřejmé $a_0 b_0 c_0 = V_0$. Dostáváme vztah

$$V = V_0(1 + 3\alpha\Delta t) = V_0(1 + \beta\Delta t). \quad (25)$$

Součinitel $\beta = 3\alpha$ se nazývá **teplotní součinitel objemové roztažnosti**; hodnoty jsou tabulovány, popř. se vypočítají z hodnoty α . Jednotkou je opět $^{\circ}\text{C}^{-1}$ resp. K^{-1} .

Všechny uvedené vztahy platí i pro zkrácení délky resp. zmenšení objemu tělesa při jeho ochlazení; tehdy je Δt záporné.

Důsledky a aplikace

- Změna délky a objemu konstrukcí (mostní konstrukce se pokládají na válce, dilatační mezery v kolejích, průvės kovových lan).
- Konstrukce rozvodů tepla (kotle nelze těsně zazdívat, písty tepelných motorů mají zastudena menší průměr než dutiny válců, pružná kolena v parovodech).
- Spojování materiálů – lze spojit jen materiály, které mají blízký koeficient tepelné roztažnosti (např. kovová a skleněná část žárovky, železobeton).
- Měřidla udávají správnou hodnotu délky při teplotě, pro niž jsou konstruována (pravítka, mikrometry, posuvná měřítka, baňky, pipety, byrety, pyknometry; speciální slitiny pro výrobu délkových prototypů).
- Bimetalaly (bimetalové teploměry, termostaty).

MALÝ SLOVNÍČEK POJMŮ

Uvádění anglických ekvivalentů českých pojmů probíraných v textu není v dnešní době snobismem, nýbrž nutností. Z důvodů „lepší čitelnosti“ textu nejsou anglické pojmy uváděny na příslušných místech textu, ale souhrnně zde v závěru.

Pojmy jsou řazeny zhruba v tom pořadí, v jakém se v textu postupně objevují. Všechny anglické termíny jsou převzaty z publikace [VSF].

fyzika pevných látek	solid state physics
solid matter	pevná látka
krystalová struktura	crystal structure
ideální / reálný krystal	ideal / real crystal
monokrystal, polykrystal	single crystal, polycrystal
kapalný krystal	liquid crystal
mřížka	lattice
základní buňka	unit cell
primitivní buňka	primitive cell
báze	basis
bodová porucha	point defect
dislokace	dislocation
hranová / šroubová porucha	edge / screw dislocation
Frenkelova / Schottkyho porucha	Frenkel / Schottky defect
intersticiální poloha	interstitial position
příměs	impurity
iontová vazba	ionic bond
kovalentní vazba	covalent bond
kovová vazba	metallic bond
vodíková vazba	hydrogen bond
deformace	deformation
pružnost	elasticity
plasticita	plasticity
Hookeův zákon	Hooke's law
modul pružnosti v tahu	modulus of elasticity, Young modulus
tah	tension
smyk	shear
torze	torsion
zkrut	relative angle of torsion, relative twisting
ohyb	bending

LITERATURA

- [MFT] Bartuška, K. – Svoboda, E.: Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2001.
- [Svo92] Svoboda, E. – Bakule, R.: Molekulová fyzika. 1. vyd. Praha: Academia, 1992.
- [Hla71] Hlavička, A. – Bělař, A. – Krčmešský, J. – Špelda A.: Fyzika pro pedagogické fakulty. 1. vyd. Praha: SPN, 1971.
- [Bei78] Beiser, A.: Úvod do moderní fyziky. 1. vyd. Praha: Academia, 1978.
- [Hor61] Horák, Z. – Krupka, F. – Šindelář, V.: Technická fyzika. 3. vyd. Praha: SNTL, 1961.
- [Lau59] Laue, M. von: Dějiny fyziky. 1. vyd. Praha: Orbis, 1959.
- [VSF] Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.

Zdroje obrázků

- [Svo92] 3, 8, 9, 10–12, 16–18
- [Hla71] 13–15, 34, 36–41
- [MFT] 32, 35
- [Bei78] 4, 19, 20, 22–25