

**UNIVERZA V LJUBLJANI**  
**FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO**

**D. VONČINA**

**MATERIALI IN TEHNOLOGIJE**

**(ZAPISKI PREDAVANJ)**

**Podiplomski študijski program 2. stopnje**

**Elektrotehnika**

**1. letnik**

**MEHATRONIKA**

**Izbirni modul F**

## Uvod

V pričujočem delu bomo obravnavali pomembnejše snovi, ki so prirejene in oblikovane za rabo v elektrotehniki. Pri tem so predvsem pomembne in zato še posebej zaželeno specifične lastnosti snovi, ki jih s pridom izkoriščamo.

Nobena veja tehnike ni povsem avtonomna. Med seboj se prepletajo in zato je lahko mnogo materialov uporabnih na različnih področjih tehnike (npr.: konstrukcijsko jeklo se uporablja v gradbeništvu, strojogradnji, metalurgiji, rudarstvu in ne nazadnje tudi v elektrotehniki). Ker je tako splošno uporabno, ga ne moremo uvrščati med izrazite elektrotehniške materiale. Pri rabi materialov na elektrotehniškem področju nas še posebej zanimajo njihove:

**a) tehnološke lastnosti in**

**b) specifične lastnosti.**

Z izkoriščanjem materiala mislimo predvsem na njegove *mehanske lastnosti*. Že samo ime nam pove, da ga uporabljamo pri najrazličnejših konstrukcijah kot so npr. ogrodja naprav, za stikalne omare, za jambore, za armature, za podstavke skupkov električnih strojev ipd.

*Feromagnetizem in električna prevodnost* pa sta *specifični lastnosti* konstrukcijskega jekla. Tako ga uvrščamo med feromagnetne materiale in obenem med prevodne materiale.

Večkratna specifičnost pa v elektrotehniki ni vedno zaželena. Idealno bi bilo, če bi lahko te specifične lastnosti izkoriščali neodvisno oz. ločeno. Včasih pa nas ta večkratna specifičnost sploh ne moti. Pri rabi konstrukcijskega jekla v elektrotehniki največkrat izkoriščamo njegove mehanske lastnosti (trdnost, nateznost), včasih pa tudi kombinacijo trdnosti in električne prevodnosti. Kot feromagnetni material je nekoliko problematično, ker ima široko histerezo zanko in zato tudi velike histerezne izgube. Težava pri večkratni specifičnosti pa se kaže v tem, da ne moremo izkoriščati feromagnetnosti in električne prevodnosti ločeno.

V naravi ni idealnih elektrotehniških materialov. S primernimi tehnološkimi postopki pa lahko do neke mere uravnavamo želene lastnosti. Lep primer so razne transformatorske pločevine in različne zlitine visokih tehnologij za izdelavo trajnih magnetov. Običajni silicijevi transformatorski pločevini lahko s toplotno obdelavo npr. z valjanjem v zaščitni atmosferi povečamo relativno permeabilnost, zmanjšamo magnetne izgube in električno prevodnost.

## 1. RAZDELITEV ELEKTROTEHNIŠKIH MATERIALOV

Za pravilno izbiro in uporabo elektrotehniških materialov pri inženirskem delu je zelo koristno znanje o:

- teoretičnih *izhodiščih za razvijanje, preizkušanje in uporabo* materialov v elektrotehniko,
- klasifikaciji elektrotehniških materialov po *lastnostih, sestavi in uporabi*,
- konkretnih *vrednostih fizikalnih, kemičnih in električnih veličin*, ki ovrednotijo lastnosti in nam omogočajo odločanje o uporabnosti materialov,
- *ekonomičnosti* uporabe materialov v načrtovani konstrukciji oz. napravi.

Materiale lahko razdelimo tudi po funkcijah, ki jih opravljajo v napravah na področju elektrotehnike:

- *aktivni elektrotehniški materiali*, ki neposredno odločajo o elektromagnetnih razmerah. Pri tem mislimo npr. na prevajanje električnega toka, na preklopne prehodne pojave v tokokrogih, na pretvarjanje električne energije v toplotno, akumuliranje magnetne energije, ločevanje dveh različnih potencialov ipd. Od njih torej zahtevamo, da doprinesejo k optimalnim pogojem pri odvijanju določenih procesov oziroma, da imajo ustrezne magnetne in električne lastnosti.
- *konstrukcijski materiali*, katerih glavna naloga je, da elemente iz aktivnih elektrotehničnih materialov mehansko povežejo v funkcionalno celoto (ohišja, jeklo, aluminij, baker, umetne mase ipd.).
- *pomožni materiali*, ki imajo lahko zelo pomembno funkcijo (npr. maziva, hladilna sredstva, laki ipd.).

Za inženirja elektrotehnike je bolj primerna in enostavnejša razdelitev materialov po lastnostih, ki odločajo o njihovi uporabnosti v elektrotehničnih in elektronskih napravah. Na ta način lahko materiale razdelimo v več skupin:

1. Prevodni materiali

- a) materiali za vodnike,
- b) materiali za upore,
- c) materiali za kontaktne pole,
- d) materiali za termoelemente,
- e) materiali za bimetalne zveze,
- f) materiali za vezi skozi steklo,
- g) loti,
- h) materiali za pokovinjanje,
- i) materiali za napajanje,
- j) superprevodni materiali.

2. Polprevodniški materiali

- a) materiali za polprevodniške diode in tranzistorje,
- b) materiali za termistorje, varistorje, fotocelice, fotoupore, fototranzistorje, ipd.

3. Izolacijski materiali ali izolanti

- a) izolanti za izolatorje,
- b) izolanti za dielektrike,
- c) impregnacijski izolanti,
- d) zalivke,
- e) feroelektrični ali seignetoelektrični materiali (barijev titanat).

4. Magnetni materiali ali magnetiki

- a) mehkomagnetni materiali,
- b) trdomagnetni materiali.

*Idealni prevodni material* bi imel specifično upornost in temperaturni koeficient enak nič, kemično bi bil odporen in mehansko čvrst oziroma ne pretrd, ne krhek in ne premehak.

*Idealni izolacijski material* bi imel neskončno veliko prebojno trdnost, relativno dielektričnost enako ena in dielektrične izgube enake nič. Podobne lastnosti bi imel tudi idealen material za dielektrike.

*Idealni mehkomagnetni material* bi moral imeti specifično upornost neskončno veliko (tako kot ima idealno izolacijsko sredstvo), histerezne izgube enake nič in neskončno veliko relativno permeabilnost.

V realnem svetu idealnih materialov ni. Z ustrezno tehnološko obdelavo lahko dosežemo spremembe kakovosti, saj so osnovne lastnosti materialov odraz kemične zgradbe oziroma značilnosti atomov. Kakšni bi bili trendi razvoja elektrotehnike, če bi lahko izdelali idealne elektrotehniške materiale? Če bi imel prevodnik za daljnovode tisočkrat večjo prevodnost in mehansko trdnost od bakra, bi bil premer vodnika enak premeru lasu. Električni stroji bi se močno zmanjšali pri enaki prejeti in oddani moči. Vse to bi vodilo k minimizaciji postrojev. Da bi to lahko dosegli, bi morali spremeniti lastnosti atomov posameznih elementov. Kot smo že uvodoma omenili, so lastnosti materialov odvisne od razvrstitve in medsebojnih povezav atomov. Snovi tvorijo tudi ioni in molekule, ki pa so zopet sestavljeni iz atomov. V tem primeru dobimo sintezo lastnosti atomov.

V nadaljevanju bomo nekaj pozornosti posvetili tudi zgradbi atomov in mehanizmu povezovanja atomov v različne strukture.

V splošnem lahko snovi razdelimo v dve skupini:

- a) *Homogene snovi*, ki imajo enotno zgradbo in pri delitvi mase dobimo snov z enakimi lastnostmi, kot jih je imela prvotna masa. V to skupino spadajo snovi z določeno kemijsko sestavo in sicer kemični elementi in čiste kemične spojine, homogene zmesi in spojine, ki so sestavljene iz več čistih homogenih snovi.
- b) *Heterogene snovi*, ki so zmesi različnih homogenih snovi in od katerih vsaka v zmesi ohranja svoje karakteristične lastnosti (sivo železo, granit, izolacijski lak, ipd.).

Osnovni gradnik snovi je torej atom, ki je sestavljen iz protonov, nevtronov in elektronov. Jedro atoma sestavljajo protoni in nevtroni, okrog njih pa se gibljejo elektroni v oblah po eliptičnih poteh. Masa elektronov je glede na maso jedra zanemarljivo majhna. Vsaki obli, po kateri potujejo elektroni, ustreza določen energijski nivo. Z dovajanjem zunanje energije, se

lahko elektron seli s poti, ki je na nižjem energijskem nivoju na drugo oblo z višjim energijskim nivojem ali celo v oblo sosednjega atoma.

Jedro atoma sestavljajo pozitivno nabiti protoni in električno nevtralni nevtroni, ki imajo enako maso in je 1837. večja od mase elektrona. To pomeni, da je skoraj celotna masa atoma skoncentrirana v njegovem jedru in je v primeru, če zanemarimo maso elektronov, enaka vsoti mas protonov in nevtronov. Razdalje med delci v atomih so nekaj desetstisočkrat večje od njihovih premerov. V trdih telesih, v katerih so atomi najgosteje razporejeni, zavzema efektivna masa le zanemarljiv del prostora, ki ga zavzema snov v običajnih pogojih. (Če bi 1 m<sup>3</sup> platine stisnili in odstranili ves prazen prostor med delci, bi dobili vso maso v volumnu, ki ne bi presegel velikosti bučikine glave).

Fizikalne in kemične lastnosti atomov so določene predvsem z elektroni v zunanji obli, s ti. valenčnimi elektroni. Le ti določajo tudi sile, ki omogočajo spajanje atomov v molekule oz. molekul v snovi v različnih agregatnih stanjih. Poleg tega imajo ti elektroni tudi pomembno vlogo pri električnih in magnetnih lastnostih atomov in molekul.

Vsa navedena dejstva se odražajo tudi v sistematični raporeditvi elementov v periodnem sistemu. Elementi so razvrščeni po vrstni številki v skupine in elementi ene skupine imajo podobne lastnosti.

Atomi enakih ali različnih elementov se medsebojno spajajo zaradi delovanja privlačnih sil v manjše ali večje skupine oziroma molekule. S spajanjem več tisoč atomov v eno molekulo dobimo ti. makromolekule, ki imajo še poseben pomen pri umetnih masah.

Način spajanja atomov v molekule je odvisen od razporeditve in možnosti oddaje ali prejema enega ali več elektronov v zunanji obli. Najpomembnejše so tri vrste kemijskih vezi, ki nastopajo pri spajanju atomov in sicer:

- a) *Ionska vez*, ki nastopi takrat, ko eden od obeh atomov z oddajo elektrona postane pozitivno nabit, drugi pa s prejemom elektrona na zunanji obli postane negativno nabit. V tem primeru se vzpostavi vez na osnovi elektrostaticne privlačne sile med kationom in anionom. Vez je zelo trdna in materiali se odlikujejo po dobrih mehanskih lastnostih ter imajo visoko tališče. Temperaturni koeficient raztezanja je ponavadi majhen in glede na slabo mobilnost elektronov so ti materiali tudi slabi električni prevodniki. V tekočem stanju imajo visoko električno prevodnost zaradi visoke koncentracije ionov. Molekule z ionsko vezjo so podobne električnim dipolom in imajo zato polarni značaj.
- b) Nastanek vezi v molekulah H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> itd. ne moremo razložiti kot posledico delovanja elektrostaticnih sil. V teh primerih ne tvorijo vezi ioni ampak *nevtralni atomi*.

Vezi tvorijo elektronski pari, ki pripadajo obema atomoma v molekuli. Vezi se imenuje *atomska ali kovalentna*. Za primer si pogledajmo molekulo klora  $\text{Cl}_2$ . Na zunanji obli atoma klora je sedem elektronov. Če se dva atoma vežeta v molekulo, potem po en elektron vsakega atoma tvori elektronski par, ki je skupen obema atomoma. Vsak elektron ima sedaj po osem elektronov na zadnji obli in ne more več tvoriti nadaljnjih vezi z ostalimi atomi ali molekulami. Posebna lastnost kovalentne vezi je, da se vzpostavljajo tudi v tridimenzionalni razporeditvi. Takšen primer je diamant, pri katerem je vsak atom ogljika obdan s štirimi atomi tako, da tvorijo tetraeder z atomi ogljika v ogliščih.

Električno so kovalentne vezi neprevodne z izjemo nekaterih polprevodniških skupin in to lastnost obdržijo tudi v tekočem stanju. Molekule s kovalentnimi vezmi so lahko polarne in nepolarne, kar je odvisno od simetričnosti zgradbe molekule. Molekule, pri katerih težišča pozitivnih in negativnih nabojev sovpadajo, so nepolarne oziroma nepolarizirane. Če pa pri neki molekuli težišča nasprotnih nabojev  $q$  ne ležijo v isti točki, ampak so za neko razdaljo  $l$  razmaknjena, potem takšna molekula predstavlja dipol. Pri takšnih molekulah lahko določimo vrednost dipolnega momenta:

$$\mu = q \cdot l$$

- c) Tretja oblika vezi med atomi je ti. *kovinska vez*. Kovino lahko obravnavamo kot sistem, ki je zgrajen iz pozitivnih ionov in je obdan s prostimi elektroni. Kovinska vez je posledica elektrostatične privlačne sile med kationi in elektroni. Prosti elektroni v kovini so glavni vzrok za dobro električno in toplotno prevodnost ter za optične lastnosti kovinskih površin (refleksija, neprozornost).

Tako se pri obravnavi materialov vedno vračamo k atomom. Zato bomo razumeli in pravilno izkoriščali lastnosti materialov le, če bomo poznali glavne lastnosti atomov.

## 2. POJMI IN DEFINICIJE ZA DOLOČANJE LASTNOSTI MATERIALOV

Če hočemo material poznati, ga moramo najprej ovrednotiti. Način preizkušanja materialov je predpisan z metodami in merilnimi napravami. Rezultat opravljenih preizkusov je v večini primerov številska vrednost. Minimum kvalitete je določen s predpisi. Standardi pa so splošno veljavni predpisi, ki določajo lastnosti in tudi metode ter priprave s katerimi se te lastnosti ugotavljajo in merijo.

V nadaljevanju poglavja so zbrani nekateri pojmi in definicije, ki so potrebni za opis in oceno elektrotehniških materialov.

### 2.1 Nekaj osnovnih pojmov in definicij

#### 1. Masa

Masa  $m$  je lastnost snovi in je določena kot razmerje med silo  $F$  in pospeškom  $a$ :

$$m = \frac{F}{a} \quad \left[ \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}} \right] \text{ ali } [\text{kg}]$$

Če se snov giblje, se giblje z isto hitrostjo tudi masa. Velikost mase je ista, ne glede na to kje se nahaja. Masa istega telesa je enaka na Zemlji, ali kjerkoli v vesolju, torej je od kraja neodvisna. Je pa odvisna od hitrosti s katero se giblje. Če je hitrost mase večja od stotinke svetlobne hitrosti, se že znatno poveča v primerjavi z maso v mirovanju. Pri svetlobni hitrosti, ki znaša v praznem prostoru 300 000 km/s, je vsaka masa neskončno velika:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

#### 2. Gostota $\rho$

Gostota homogenega telesa  $\rho$  nam pove kakšno maso ima snov na enoto prostornine:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \quad \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

Gostota vode pri 4° C, pritisku 10<sup>5</sup> Pa ali 760 mm Hg, je približno 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup> (999,973 kg/m<sup>3</sup>).



**$\rho$  je odvisna od temperature in pritiska.** Z višanjem temperature snovi se gostota zmanjšuje. Ob zviševanju pritiska pa se dogaja ravno obratno in gostota se povečuje. Gostoto snovi lahko poimenujemo tudi specifično maso snovi. V nekaterih primerih jo uporabljamo tudi kot razmerje med maso in dolžino telesa. (npr. gostota bakrene žice na dolžinski meter).

### 3. Specifična teža snovi $\sigma$

Specifična teža snovi je teža enote prostornine, torej teža enega kubičnega metra snovi:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right]$$

### 4. Agregatno stanje snovi

Razlikujemo tri agregatna stanja: trdno tekoče, in plinasto. Trdne snovi imajo konstanten volumen in določeno zunanjo obliko, ki se lahko spremeni le zaradi delovanja močnih zunanjih sil. Te snovi lahko razdelimo v dve večji skupini. V prvi so materiali s kristalno strukturo, v drugi pa so amorfni materiali. Pri materialih s kristalno strukturo lahko točno določimo tališče. Pri amorfnih materialih je značilna poljubna razporeditev atomov. Tudi tališče teh materialov ni točno določeno.

V splošnem je lahko snov pri normalni temperaturi trdna, tekoča ali plinasta. Razlikovati moramo še prehodna stanja med trdnim in tekočim stanjem, med tekočim in plinastim in med trdnim ter plinastim. Ob delovanju zunanjih fizikalnih vplivov lahko snov nastopa v več agregatnih stanjih. Takrat govorimo o fazah. (tekoča, trdna in plinasta).

Aluminij je pri pritisku  $133,322 \cdot 10^4$  Pa in pri temperaturi  $1461$  °C plinast, pri normalnem zračnem pritisku  $10^5$  Pa in temperaturi  $658$  °C je tekoč, pri nižjih temperaturah in pri normalnem pritisku pa je trdna snov. Helij je lahko le plinast ali tekoč.

### 5. Izotropnost in anizotropnost

Če ima snov v vseh smereh enake lastnosti, govorimo o izotropnih snoveh. Pri anizotropnih snoveh je vsaj ena lastnost odvisna od opazovane smeri oz. od smeri testiranja. Sljuda, les in podobni materiali se v vzdolžni smeri drugače obdelujejo kot pa v prečni smeri. Valjano jeklo ima v eni smeri večjo natezno trdnost kot v drugi. Nekateri materiali so za vse lastnosti izotropni, drugi pa samo za nekatere. Steklo je lahko izotropno za prevajanje toplote, anizotropno pa glede loma svetlobe. Sljuda je v vseh lastnostih anizotropna. Anizotropnost je naravni pojav (npr. pri kristalih) ali pa jo ustvarimo umetno (če npr. povečamo mehansko

trdnost v določeni smeri). Naravnih anizotropij v glavnem ne moremo odpraviti, umetne pa lahko. Natezno trdnost jekla v določeni smeri lahko s prežarjenjem zmanjšamo in s tem napravimo jeklo, ki je glede na natezno trdnost izotropno.

## 6. Struktura in tekstura snovi

Če je kos snovi sestavljen iz zrn, potem govorimo o zrnati strukturi. S pojmom tekstura materiala označujemo način sestave zrn v nekem telesu.

Zrna so lahko:

- *kroglasta* - govorimo o globulitski strukturi (orodna legirana jekla)
- *podolgovata* - govorimo o igličasti strukturi (zunanje plasti odlitkov iz litega železa)
- *podobna ploščicam* - govorimo o lamelasti strukturi (kos grafita)
- *vlaknasta* - sestavne enote materiala so iz vlaken (papir)

Tekstura pride do izraza zlasti pri igličastih, ploščičastih zrnih in vlaknih.

1. primer:

Bombažna vata in nit sta sestavljeni iz istih vlaken, vendar se razlikujeta po teksturi. Pri niti so vlakna razporejena paralelno, zato ima tudi boljše mehanske lastnosti.

2. primer:

Kadar imajo kristali v snovi enotno orientacijo, potem ima kovina teksturo. Zaradi tega so njene lastnosti odvisne od smeri. To s pridom izkoriščamo npr. pri magnetnih materialih, jeklenih vrveh ipd.

Lahko zaključimo, da je tekstura snovi pomemben faktor, ki vpliva na mehanske lastnosti snovi.

## 7. Monomorfnost, polimorfnost in amorfnost.

- Monomorfna snov nastopa le v eni kristalni obliki.
- Polimorfna snov pa nastopa v več kristalnih oblikah.  
(Jeklo z 0,9 % ogljika ima pri temperaturi nad 721 °C kubično ploskovno centrirano kristalno celico, pod to temperaturo pa kubično prostorsko centrirano kristalno celico).
- Amorfnost nima kristalne zgradbe (steklo, parafin).

#### 8. Tališče in strdišče

*Tališče* je definirano s temperaturo, pri kateri se snov pri atmosferskem tlaku  $10^5$  Pa stali. Potrebno toploto za taljenje enega kg trdne snovi imenujemo talilna toplota.

*Strdišče* je temperatura pri kateri se raztaljena snov pri tlaku  $10^5$  Pa strdi. Pri tej spremembi agregatnega stanja odda 1 kg snovi toploto, ki jo imenujemo toplota strjevanja. **Pri kristaliziranih snoveh sta tališče in strdišče pri isti temperaturi**, saj se kristal pri povišani temperaturi ne mehča ampak nastane neposredno iz trdne snovi tekoča. **Pri amorfnih ali nehomogenih strukturah kot so npr. steklo, keramika, termoplasti itd., imata strdišče in tališče različni temperaturi. Govorimo o območju strjevanja in taljenja.**

#### 9. Vrelišče

To je temperatura, pri kateri se v neki tekočini prično razvijati pare pri normalnem zračnem tlaku. Čim nižji je tlak nad gladino tekočine, tem nižje bo vrelišče. Tekočina se torej spreminja v paro.

Primer:

Raztaljeni aluminij preide pri zunanjem tlaku ( $10^{-4}$  Pa) v pare že pri  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 10. Plamenišče

To je temperatura, pri kateri gorljiv material gori dokler je v stiku s tujim plamenom, vendar pa sam ne gori.

#### 11. Vnetišče

To je temperatura, pri kateri se material vname sam in gori samostojno brez dovajanja toplote od zunaj. Toplota, ki se sprošča je tolikšna, da ob prisotnosti kisika vzdržuje gorenje.

#### 12. Kapljišče

To je temperatura  $\vartheta_K$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], pri kateri se materiali, ki se pri povišanju temperature mehčajo, spremenijo v tekočino.

13. Zgostišče

To je temperatura  $\vartheta_{ZG}$  [°C], pri kateri tekoči materiali prenehajo teči pod vplivom težnostne sile. (olje, pentaklor, difenil... ).

14. Temperatura transformacije

To je temperatura  $\vartheta_{TR}$  [°C], pri kateri je material na meji trdnega in viskoznega stanja. Pri tej temperaturi se skokoma spremenijo lastnosti materiala. (steklo izgubi svojo notranjo napetost ).

15. Sobna temperatura

To je normirana temperatura okolice pri kateri opravljamo meritve in preizkuse, če ni drugače predpisano. Za Evropo velja 20 °C.

16. Delovna temperatura:  $\vartheta_D$  [°C]

Pri tej temperaturi material trajno obratuje  $\vartheta_D$  [°C]. Običajno se podaja delovno temperaturno območje od  $\vartheta_{D, min}$  [°C] -  $\vartheta_{D, max}$  [°C]

Npr. - 20 °C do 75 °C.

17. Vpojnost za vodo

To lastnost preizkušamo tako, da material s **površino 100 cm<sup>2</sup> pustimo sedem dni pri temperaturi 20 °C v destilirani vodi**. Prirastek teže pove količino absorbirane vlage.

$\sigma_V$  (mg / 100 cm<sup>2</sup>, 7 dni)

18. Vsebina vlage

Je razmerje med težo vlage in težo suhega materiala v %:

$$vl(\%) = 100 \cdot \frac{G_m - G_s}{G_s} = \frac{G_{vl}}{G_s} \cdot 100$$

$G_{vl}$  - teža vlage,

$G_m$  - teža vlažnega materiala,

$G_s$  - teža suhega materiala, (posebno pomemben podatek za izolacijske materiale).

19. Relativna vlaga

**Je razmerje med trenutno težo vodne pare v zraku in težo vodne pare, ki bi bila lahko v isti atmosferi pri isti temperaturi in bi bila atmosfera popolnoma nasičena z vlago.** Tudi ta podatek je zelo pomemben za izolacijske materiale in merilne naprave. V tropskih krajih je lahko maksimalna vlaga tudi 100 %.

20. Prepuščanje vlage  $\zeta$

To je količina vode v gramih, ki jo prepušča material debeline 1 mm in površine 1 cm<sup>2</sup> v 1 h, če je na eni strani popolnoma suh zrak, na drugi strani pa nasičena para pri istem pritisku kot zrak na sprednji strani.  $\zeta$  je določen z [g mm / cm<sup>2</sup> h Bar].

Poznamo tudi prepuščanje plinov v cm<sup>3</sup> pri 0 °C, če imamo material debeline 1 mm, površine 1 dm<sup>2</sup> in razliko v pritisku plina na eni in drugi strani 10<sup>5</sup> Pa.  $\zeta$  je določen z [cm<sup>3</sup> (NTP) mm / dm<sup>2</sup> H 10<sup>5</sup> Pa].

[NTP - normalna temperatura 0 °C in pritisk 10<sup>5</sup> Pa].

21. Mehanska napetost  $\sigma$

To je sila, ki deluje pravokotno na 1 m<sup>2</sup> preseka nekega telesa in je po preseku enakomerno porazdeljena:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

$\sigma$  - mehanska napetost [N/m<sup>2</sup>]

$F$  - sila na presek telesa [N]

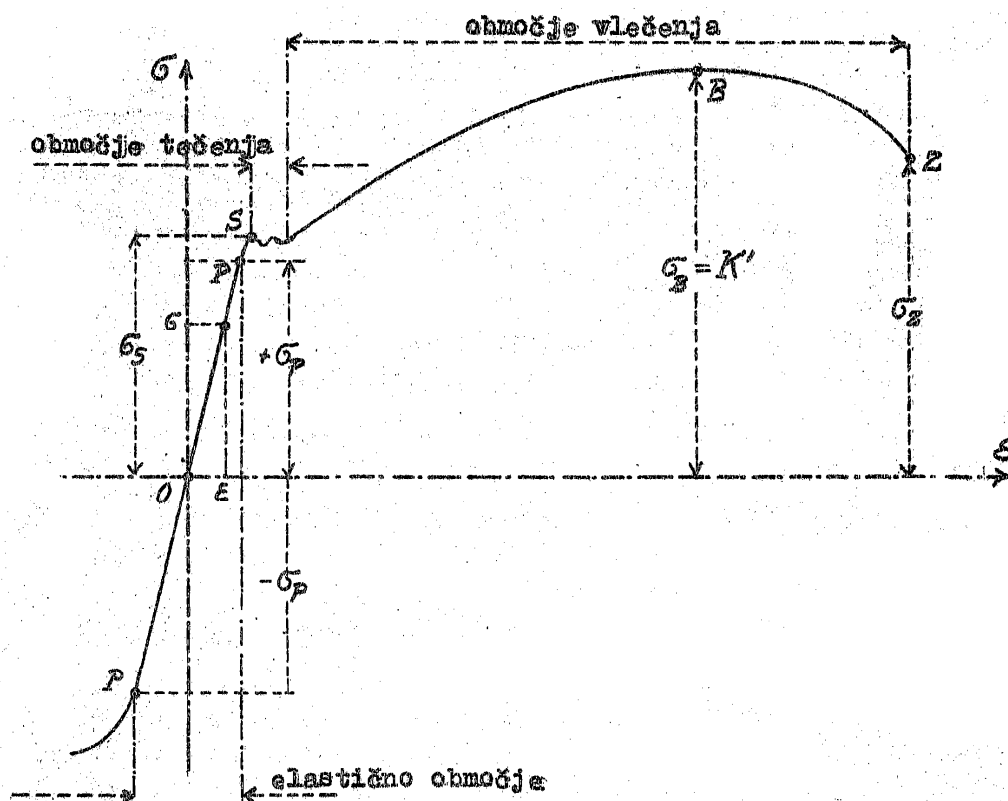
$S$  - presek telesa [m<sup>2</sup>]

Glede na to kako sila na telo deluje ločimo:

- natezna napetost  $\sigma_n$  je posledica sile, ki telo nateza
- tlačna napetost  $\sigma_{tl}$  je posledica sile  $F$ , ki telo stiska
- pri strižni napetosti  $\sigma_s$  deluje sila paralelno na presek telesa
- upogibna napetost  $\sigma_u$  pa deluje tako, da palico upogne.

Mehanske napetosti ( $\sigma_n$ ,  $\sigma_{tl}$ ,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_u$ ) telesa deformirajo. Vsak material (kovine in nekovine) ima svoj  $\sigma = f(\epsilon)$  diagram, ki ga lahko definiramo na dva načina: strogo fizikalno ali pa poenostavljeno po posebnem dogovoru. Poenostavljeni diagram imenujemo tudi konvencionalni tehnični  $\sigma - \epsilon$  diagram. Pri tej vrsti diagrama, ki je v tehnični praksi najbolj v rabi, velja dogovor, da je  $\sigma_{teh} = F/S_0$  in  $\epsilon_{teh} = \delta l/l_0$ , to se pravi, da delimo natezno silo  $F$  z začetnim presežkom  $S_0$  in raztezek  $\delta l$  z začetno merilno dolžino  $l_0$ . Pri fizikalnem  $\sigma - \epsilon$  diagramu se pri natezni sili  $F$  začetna merilna dolžina  $l_0$  poveča na  $l = l_0 + \delta l$ , začetni presek  $S_0$  pa zmanjša na  $S = S_0 - \delta S$ . Resnična (fizikalna) natezna napetost je  $\sigma_{fiz} = F/S$  in dejanski specifični raztezek je  $\epsilon_{fiz} = \delta l/l$ .

Pri obremenitvah v elastičnem območju se diagrama praktično skladata. Večje razlike dobimo pri obremenitvah, ki povzročajo plastične deformacije, še posebno v bližini porušenja, ko se presek preizkušanca zelo zmanjša. Za nosilne konstrukcije pridejo v poštev samo materiali, ki imajo visoko mejo elastičnosti. Kompletni  $\sigma - \epsilon$  diagram do pretrganja je je narisana na sliki 2.1.



Slika 2.1 Kompletni  $\sigma - \epsilon$  diagram

Diagram je sestavljen iz dveh izrazitih delov. Prvi del je strma premica OP, drugi del pa je razvlečena krivulja od točke P do točke Z. Točka P se imenuje meja proporcionalnosti. Če ustavimo preizkus pri nekem stanju ( $\sigma, \varepsilon$ ), ko je  $\sigma < \sigma_p$ . (t.j. pod mejo proporcionalnosti), nato pa preizkušanca popolnoma razbremenimo, se vrnemo po isti premici zopet v začetno stanje 0 ( $\sigma = 0, \varepsilon = 0$ ). Ta eksperiment nam da dve pomembni lastnosti materiala:

1. Specifični raztezki so proporcionalni natezni napetosti  $\sigma$  in
2. Proces obremenjevanja in razbremenjevanja je reverzibilen.

Krivulja od točke P do točke Z opisuje plastično območje. Deformacije niso več proporcionalne napetostim in deformacijski proces ni več reverzibilen. Pri razbremenitvi se ne vrnemo več v začetek 0, kajti preizkušavec izkazuje neko stalno deformacijo.

Če obremenitev povečamo preko meje proporcionalnosti ( $\sigma > \sigma_p$ ), preidemo iz **območja elastičnosti v območje tečenja**. Kmalu dosežemo točko S z ustrežno napetostjo  $\sigma_s$ , vendar specifični raztezki narastejo nekoliko hitreje kot v predhodni fazi (segment PS je nekoliko odklonjen od premice OP). Od točke S dalje se raztezki še vedno povečujejo, medtem ko napetost rahlo niha. Ko se material stabilizira, preneha območje tečenja in se prične obsežno območje **vlečenja**. Natezna napetost zopet zvezno narašča, toda mnogo počasneje kot spremljajoče deformacije. To območje je določeno s tremi točkami S, B in Z, ki jim ustrezajo naslednje napetosti:

S - navidezna meja elastičnosti  $\sigma_s$

B - natezna trdnost  $\sigma_B$

Z - porušitvena natezna napetost  $\sigma_Z$

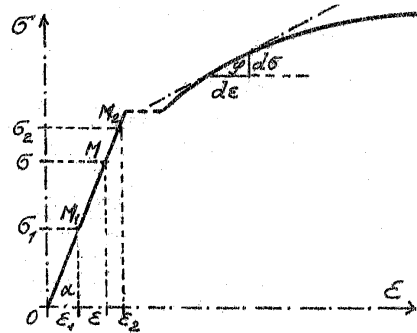
$\sigma_B$  je največja napetost, ki jo dobimo pri natezanju preizkušanca. Napetost  $\sigma_Z$ , pri kateri se preizkušavec pretrga ob spremljavi izredno velike kontrakcije prereza v okolici pretrga, je v splošnem manjša kot  $\sigma_B$ .

Pri vseh tehničnih konstrukcijah bomo poskrbeli za to, da ne presežemo meje elastičnosti, ki se praktično ujema z mejo proporcionalnosti. Za prakso je torej pomembno samo območje proporcionalnosti, ki si ga bomo poglobljevali.

Proporcionalnost specifičnih raztezkov in natezних trdnosti je izražena s Hookovim zakonom:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ ali } \frac{dl}{l_0} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{E \cdot S} \text{ ali } dl = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot S}$$

Konstanta E se imenuje modul elastičnosti in je enaka vrednosti natezne napetosti, pri kateri bi se dolžina materiala podvojila. ( $\delta l = l_0$  ali  $\varepsilon = 1$ ).



Slika 2.2 Določitev modula E

Iz slike 2.2 vidimo, da je:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha = \text{konst.}$$

Modul  $E$  je torej tangens kota  $\alpha$ , ki ga oklepa Hookova premica z abscisno osjo.

## 22. Permanentna odpornost

Če npr. aluminij ali baker za dalj časa obremenimo s konstantno napetostjo opazimo, da se material po malem razteza, dokler po določenem času ne doseže končnega raztezka dolžine  $l$ . Če bi predpisali stalni raztezek 0,2 % in čas  $10^5$  ur, potem se napetost imenuje permanentna odpornost  $\sigma_{\text{odp},(0,2/10^5)}$  [N/mm<sup>2</sup>].

## 23. Trdota

To je odpornost materiala proti udiranju drugega materiala, ki je trši. Označujemo jo s podatki, ki jih črpamo iz različnih metod. Enote za merjenje trdote so iste kot pri merjenju pritiska [N/m<sup>2</sup>] ali pa so kar relativne vrednosti. Pomembno je, da glede na material izberemo pravo metodo za merjenje. Različni avtorji so razvili ločene metode, ki si jih bomo v nadaljevanju podrobneje ogledali.

### a) Mohsova trdotna lestvica

Vsebuje deset materialov. Prvi je najmehkejši lojavec in zadnji, najtrši, je diamant.

- |            |              |
|------------|--------------|
| 1. lojavec | 6. živec     |
| 2. sadra   | 7. kremenjak |
| 3. apnenec | 8. topaz     |
| 4. fluorit | 9. korund    |
| 5. apetit  | 10. diamant  |



Primeri:

aluminij	2 - 3
baker	2,5 - 3
medenina	3,5
jeklo	4,5 - 6,5

Ta lestvica kvantitativno v tehniki ni uporabna. Npr. razmerje trdote med korundom in diamantom je 1:140.

### a) Brinellova trdota $H_B$ ali HB

Pri tej metodi uporabljamo trdo jekleno kroglico, ki jo z določeno silo vtiskamo v preizkušani material. Za kovine je premer kroglice 10 mm, sila  $3 \times 10^4$  N pa mora delovati 30 s.

Dobljeni rezultat označimo z:

$$HB_{10/30000/30}$$

Za plastične materiale uporabljamo kroglice s premerom 5 mm, silo 500 N za čas od 10 do 60 s. Po prenehanju delovanja sile, izmerimo višino ali površino vdrtine in njen premer.

Trdoto izračunamo po enačbi:

$$H_B = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot h \cdot d} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

$F$  - sila [N]

$S$  - površina vdrtine [mm<sup>2</sup>]

$h$  - višina vdrtine [mm]

$d$  - premer vdrtine [mm]

$D$  - premer kroglice [mm]

$H_B$  - Brinellova trdota [N/mm<sup>2</sup>]

Brinellovo metodo uporabljamo do vrednosti 4500 N/mm<sup>2</sup>.

**b) Vickersova trdota HV**

V material vtiskamo diamantno piramido s kvadratično osnovnico in vršnim kotom med dvema nasprotnima ploskvama 136°. Sile vtiskanja so 50, 100, 300 in 500 N. Sile izbiramo tako, da je diagonala  $d$  vdrtine enaka ali večja od 0,4 mm.

Trdoto izračunamo s pomočjo enačbe:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$d$  - diagonala vdrtine [mm]

**c) Rockwellova trdota HRC**

V material vtiskamo bodisi jekleno kroglico premera 1,588 mm ali 3,175 mm ali pa diamantni stožec z vršnim kotom 120°. Sile izbiramo med 100 in 1500 N. Vrednosti trdote odčitavamo direktno na merilnem instrumentu s skalami od A do H. (običajno uporabljamo A, B in C skalo)

24. Odpornost proti udaru  $\alpha_u$

Pri tem preizkusu uporabljamo posebno nihalo z utežjo. Z njim razbijemo ploščico iz krhke kovine ali umetnih mas. Ploščica mora imeti eno ali dve zarezi. Iz višine, na katero dvignemo nihalo, izračunamo odpornost proti udaru z izrazom:

$$\alpha_u = \frac{G \cdot h}{S} \left[ \frac{N}{m} \right]$$

$G$  - teža uteži [N]

$h$  - višina pada v [m]

$S$  - presek ploščice v [m<sup>2</sup>]

$\alpha_u$  - odpornost proti udaru

25. Temperaturni raztezek

To je podaljšanje 1 m dolge palice, ki jo segrejemo za 1 °C. Govorimo o linearnem temperaturnem raztezku:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \cdot \left( \frac{dL}{dT} \right) \left[ \frac{1}{^\circ C} \right]$$

$L_0$  - dolžina palice pri 0 °C. V splošnem lahko izberemo tudi drugo referenčno temperaturo.

Dolžina palice pri poljubni temperaturi bo:

$$L = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad [\text{m}]$$

$\Delta T$  - razlika med referenčno in temperaturo pri kateri merimo oz. bi radi vedeli, kakšna bo sprememba dolžine.

Analogno linearnemu temperaturnemu raztežku poznamo tudi volumenski:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dT} \right)$$

Ta je približno trikrat večji od linearnega:

$$\beta \cong 3 \cdot \alpha$$

Obstaja pa tudi površinski temperaturni raztezek  $\gamma$ :

$$\gamma = 2 \cdot \alpha$$

## 26. Specifična toplota $c$

To je toplota, ki je potrebna, da segrejemo 1 kg snovi za 1 °C. Pri segrevanju ne dovolimo, da bi se povečal volumen snovi  $V$ . V tem primeru dobimo specifično toplotu pri konstantnem volumnu ( $c_V$ ).

Če pa pazimo, da se pri segrevanju pritisk ne poveča, potem je to meritev pri konstantnem pritisku in specifično toplotu označimo s  $c_p$ .

Pri trdnih snoveh je  $c_p$  od 3 do 5 % večja od  $c_V$ . Povprečno specifično toplotu  $c_{sr}$  za temperaturni interval  $T_1 - T_2$  izračunamo iz potrebne toplote  $Q$  za segretje 1 kg snovi od  $T_1$  do  $T_2$ .

$$Q = c_{sr} \cdot m \cdot \Delta T$$

$$\text{oz. } c_{sr} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

Specifična toplota  $c_{sr}$  je odvisna od temperature in strukture snovi. Ista snov ima lahko v različnih oblikah različne vrednosti  $c_{sr}$ . Npr. ogljik:

amorfni ogljik:  $c_{sr} = 1092 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

lesno oglje  $c_{sr} = 1008 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

grafit  $c_{sr} = 845 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Dobra hladilna sredstva imajo visoko specifično toplotu. Vodik je izvrstno hladilno sredstvo, ki ga izkoriščamo pri hlajenju velikih električnih generatorjev.

### 27. Toplotna prevodnost $\lambda_T$

Najvernejša definicija za toploto je, da je toplota oblika energije. Več energije, kot je v telesu, višjo temperaturo ima telo.

V telesu povzroča toplota gibanje elementarnih delcev, plinske molekule pridobivajo na hitrosti, molekule in atomi trdnih snovi pa vse močnejše nihajo okrog svojih osnovnih položajev. Povečuje se kinetična energija delcev, ki se odraža v povišanju temperature.

Pri vstopu toplote v telo, se na tem mestu poveča kinetična energija delcev snovi. Po telesu se naprej prenaša z določeno hitrostjo, ki je odvisna od specifične toplote snovi (časovna konstanta segrevanja). Smer potovanja toplote je vedno od višje proti nižji temperaturi telesa.

Toplotna prevodnost snovi je količina, ki pove, koliko toplote lahko preide skozi snov s presekom  $1 \text{ m}^2$  v dolžini  $1 \text{ m}$  v času  $1 \text{ s}$  pri temperaturni razliki  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  na dolžinski meter .

$$\lambda_T = \frac{Q_p \cdot l}{S \cdot \Delta T} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \right]$$

$$Q_p = \frac{\lambda_T \cdot S \cdot \Delta T}{l} \quad [\text{W}], \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$

$Q_p$  - količina toplote, ki preteče skozi telo v času  $1 \text{ s}$

$S$  - presek telesa [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta T$  - temperaturna razlika med koncema telesa [ $^\circ\text{C}$ ]

$l$  - dolžina telesa [ $\text{m}$ ]

$\lambda_T$  - toplotna prevodnost [ $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ]

Prevajanje toplote je identično prevajanju električnega toka.

### 28. Toplotna prehodnost

To je množina toplote, ki preide v  $1 \text{ s}$  pri  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$  skozi  $1 \text{ m}^2$  dotikalne površine dveh različnih materialov. Npr. prehod toplote iz površine peči v zrak.

29. Specifična upornost  $\rho$ 

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad \left[ \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \right] = [10^{-6} \Omega \text{ m}]$$

Specifična upornost je odvisna od dolžine materiala, preseka palice  $S$  in upornosti  $R$ . Specifična prevodnost  $\lambda$  je recipročna vrednost specifične upornosti.

Ker je upornost odvisna tudi od temperature, govorimo o pozitivnih in negativnih temperaturnih koeficientih. Spremembo upornosti s spreminjanjem temperature merimo s temperaturnim koeficientom  $\alpha_{\vartheta}$ . Upornost večine kovin s temperaturo narašča, medtem ko upornost oglja ali nekaterih karbidov s temperaturo pada.

$$R_2 = R_1 \left[ 1 - \alpha_{\vartheta_1} (\vartheta_1 - \vartheta_2) \right],$$

pri čemer je  $\alpha_{\vartheta_1}$  temperaturni koeficient upornosti pri konstantni masi.

$$\alpha_R = \frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\Delta \rho \cdot l}{\Delta T \cdot S} \cdot \frac{S}{\rho \cdot l} = \frac{\Delta \rho}{\rho \cdot \Delta T}$$

Npr. za baker pri 0 °C je  $1,5 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$  in pri 100 °C je  $2,2 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$

$$\alpha_{R, \text{Cu}} = 4,7 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$$