

# **ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI**

Doc. dr Milena Đukanović  
milenadj@ac.me

---

# UVODNO PREDAVANJE

---

## **Cilj izučavanja predmeta Elektrotehnički materijali je da studenti upoznaju:**

- najbitnije aspekte nauke o materijalima,
- fizička, hemijska, mehanička i druga svojstva elektrotehničkih materijala,
- standarde,
- pojmove i definicije vezane za tehnologiju elektrotehničkih materijala.

U sklopu predmeta pruža se uvod u moderne tehnologije, poput biomaterijala i nanotehnologija.

Kroz laboratorijske vježbe u programu SolidWorks, koji koristi preko 2 miliona inženjera i dizajnera, studenti će se obučiti da modeluju i kasnije štampaju na 3D štampač razne oblike, koristeći raznovrsne materijale i filamente.

## ORGANIZACIJA PREDMETA I POLAGANJE ISPITA:

Polaganje ispita sastoji se od:

- 1) prvog dijela ispita (VIII nedjelja) koji nosi 30 bodova,
- 2) laboratorijskih vježbi koje se boduju sa maksimalno 20 bodova,
- 3) seminarskih radova koji nose maksimalno 10 bodova,
- 4) drugog dijela ispita koji nosi 40 bodova.

U planu je da ova generaciju ima završnu izložbu 3D štampanih radova inspirisanih Kinom i kineskom kulturom, naukom, umjetnošću itd.

Ovaj projekat je podržan od strane Instituta Konfucije na Univerzitetu Crne Gore, Ministarstva prosvjete Kine i Ministarstva nauke Crne Gore (konkurs za inovativne projekte).

## NAČIN PROVJERE ZNANJA STUDENATA:

Zaključna ocjena na predmetu Elektrotehnički materijali se dobija prema zbiru svih bodova koje je student ostvario u toku semestra, dakle, sabiraju se bodovi ostvareni na prvom i drugom dijelu ispita, laboratorijskim vježbama, seminarskim radovima. Ukoliko student nije zadovoljan rezultatom sa prvog ili drugog dijela ispita, ima mogućnost ponovnog polaganja.

**Ocjena = broj bodova na prvom i drugom dijelu ispita + broj bodova na laboratorijskim vježbama + broj bodova na seminarskim radovima**

<b>Bodovi</b>	<b>Ocjena</b>
50-59	E
60-69	D
70-79	C
80-89	B
90-100	A

## Literatura:

1. Bilješke sa predavanja i vježbi.
2. Power Point prezentacije.
3. P. Nikolić, D. Raković, „Elektrotehnički materijali“, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
4. D. Raković, „Fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala“, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1995.
5. Ž. Spasojević, Z. Popović, „Elektrotehnički i elektronski materijali“, Pomezia, Beograd, 1995.
6. P. Osmokrović, „Elektrotehnički materijali“, Akademska misao, Beograd, 2003 (na fotokopirnici).
7. Dodatno gradivo i informacije iz Elektrotehničkih materijala moguće je pronaći u velikom broju drugih knjiga, članaka, kao i na Internetu.

# UVOD U ELEKTROTEHNIČKE MATERIJALE

- Za izradu *elektrotehničkih proizvoda* koriste se različiti *materijali* koji se razlikuju po građi i po svojstvima.
- Za izradu *materijala* potrebne su *sirovine*.
- Da bi se dobio kvalitetan elektrotehnički proizvod, neophodno je poznavati vezu sljedećih faktora:



- Promjenom samo jednog od ova četiri faktora, jedan ili više preostalih faktora se takođe mijenjaju. Iz tog razloga, neophodno je odrediti na koji način su ti faktori uvezani, kako bi se konačno dobio željeni elektrotehnički proizvod.

# UVOD U PRIMJENU MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 1. PROVODNICI

- Za izradu provodnika biraju se materijali koji dobro provode električnu struju i toplotu. Električna provodnost im je veća od  $10 \cdot 10^6$  S/m.
- Prema vrsti nosilaca naelektrisanja dijele se na:
  - Provodnike 1. reda (ili 1. vrste) (metali i metalne legure)
  - Provodnike 2. reda (ili 2. vrste) (elektroliti)
- Kod provodnika prvog reda slobodni elektroni su nosioci naelektrisanja, dok su kod provodnika 2. reda nosioci naelektrisanja joni.
- Provodnici prvog reda se uglavnom koriste u polikristalnom stanju, a njihova mehanička svojstva su bitno određena mehaničkom i termičkom obradom.



# UVOD U PRIMJENU MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 1. PROVODNICI

- Najbolji provodnici su **metali**, kao što su *bakar, aluminijum i srebro*. U dobre provodnike spadaju još i *zlato i platina*, ali se iz objektivnih razloga ne koriste. Kod metala, elektroni iz spoljašnje elektronske ljuske atoma su slabo vezani za atom, otuda se slobodno kreću od atoma do atoma kroz materijal.
- U slučaju **tečnih rastvora**, neutralni molekuli rastvorene supstance se raspadaju na dva suprotno naelektrisana dijela, tj. *pozitivne i negativne jone*. Joni mogu da postoje i u **gasovima**. Ako u nekom gasu nema jona, ne može doći ni do kretanja naelektrisanih čestica pod dejstvom električnih sila i gas se ponaša kao izolator.



# UVOD U PRIMJENU MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 2. POLUPROVODNICI

- Poluprovodnički materijali služe za izradu aktivnih poluprovodnih komponenata. Imaju visoku električnu otpornost (od nekoliko desetina do nekoliko stotina hiljada  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ). Temperaturni koeficijent otpora im je negativan.
- Najpoznatiji materijali iz ove grupe su:
  - silicijum
  - germanijum
  - selen
  - oksidi bakra, cinka, urana
  - srebro sulfid
  - talijev sulfid
  - titanijev dioksid

# UVOD U PRIMJENU MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. SUPERPROVODNICI

- Materijali koji provode električnu struju bez gubitaka nazivaju se superprovodnici.
- Pojava superprovodnosti dešava se na vrlo niskim temperaturama, bliskim apsolutnoj nuli ( $T=0K$ ) ili preciznije - na temperaturi tečnog helijuma ( $T=4,2K$ ).
- Da bi kod nekog materijala nastupila pojava superprovodnosti nije dovoljno samo ostvariti temperature ispod kritične.
- Na ovu pojavu utiču i magnetno polje ( $H$ ) u u kojem se superprovodnik nalazi i gustina struje ( $J$ ) u njemu. Dakle, moraju biti ispunjeni i uslovi da je magnetno polje manje od nekog kritičnog ( $H < H_{Kr}$ ) i da je gustina struje manja od neke kritične ( $J < J_{Kr}$ ), pri čemu postoji određena međuzavisnost  $H_{Kr}$ ,  $J_{Kr}$  i  $T_{Kr}$ .
- **Superprovodnost** je fenomen koji se pojavljuje kod određenih materijala na niskim temperaturama, a karakteriše ga potpuno odsustvo električnog otpora i pojava iščezavanja magnetnog polja u unutrašnjosti superpovodnika (Majnsеров efekat).

# UVOD U PRIMJENU MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 4. IZOLATORI

- Za izradu električne izolacije koriste se izolatori ili dielektrici.
- To su materijali kod kojih su u normalnim uslovima elektroni iz spoljašnje elektronske ljuske čvrsto vezani za svoj atom ili grupu atoma koji obrazuje molekul. Karakteriše ih visoka električna otpornost ( $10^6 - 10^{18} \Omega\text{m}$ ).
- Najpoznatiji materijali iz ove grupe su:
  - PVC
  - silikonska guma
  - kvarcno staklo
  - poliuretani
  - porculan
  - destilovana voda
  - drvo
  - vakuum (koji se smatra idealnim izolatorom)



# UVOD U PRIMJENU MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

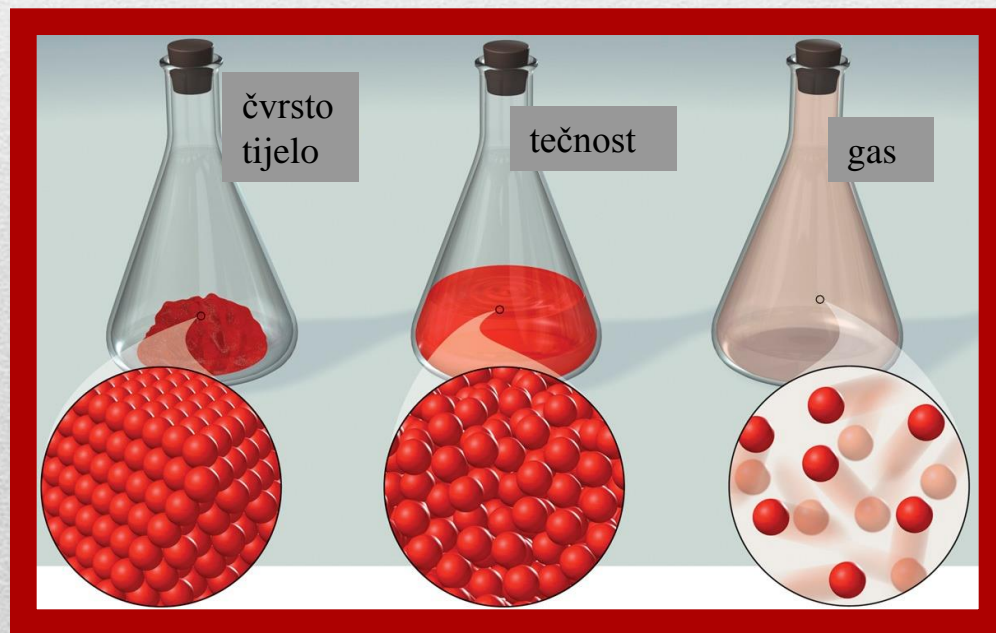
## 5. MAGNETICI

- Pod magnetnim osobinama materijala podrazumijevamo sve mikroskopske i makroskopske manifestacije odziva materijala na uticaj magnetnog polja. Odziv materijala na magnetno polje karakterišemo veličinom koju nazivamo magnetna susceptibilnost.
- Prema znaku i veličini magnetne susceptibilnosti materijale dijelimo na:
  - dijamagnetne
  - paramagnetne
  - feromagnetne.
- Feromagnetni materijali se dijele na:
  - feromagnetne
  - ferimagnetne
  - antiferomagnetne.



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

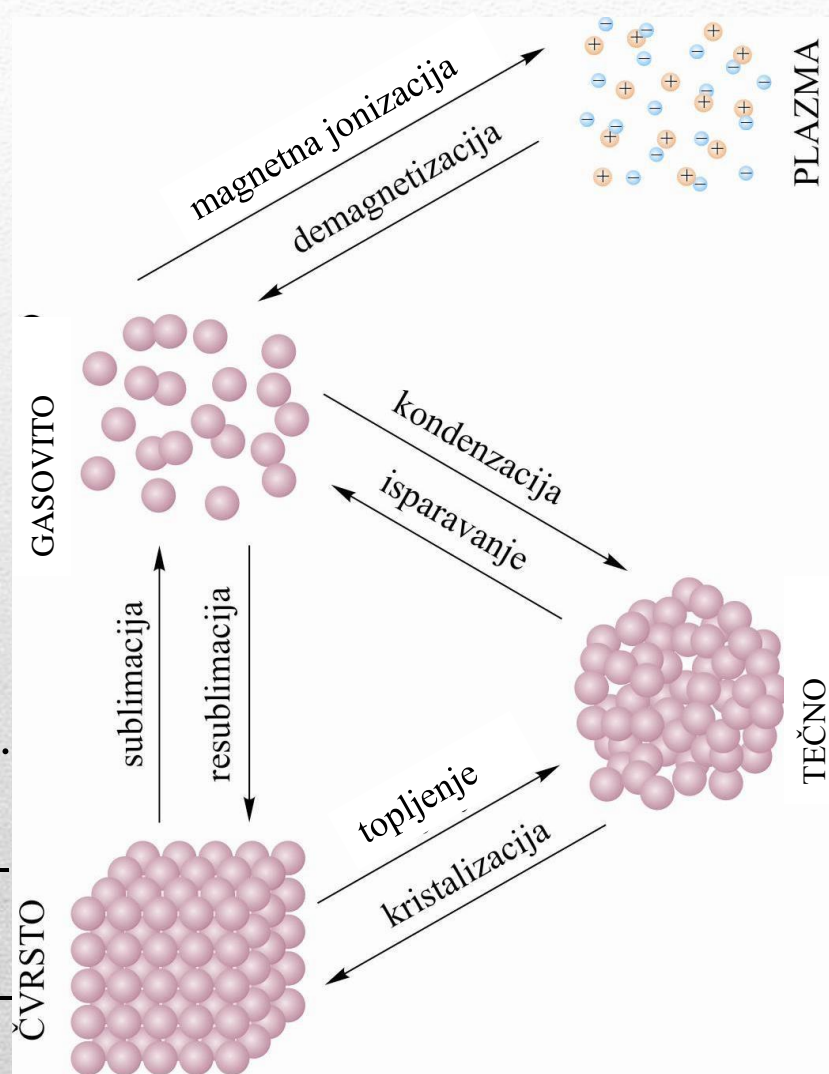
- Materija se u prirodi javlja u tri osnovna agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom.
- Prelaz iz jednog agregatnog stanja u drugo naziva se *fazni prelaz*. U tom procesu, mijenja se samo relativni raspored čestica i/ili njihova pokretljivost ali, ne i njihova hemijska priroda. Dakle, promjena agregatnog stanja je isključivo fizički proces i može da bude skokovita (topljenje leda, isparavanje vode) ili kontinualna (omekšavanje stakla).
- Na temperaturi apsolutne nule gotovo sve supstance su u čvrstom stanju. Sa porastom toplote supstanca se topi u tečnost na tački topljenja, ključa u gas na njenoj tački ključanja, dok na ekstremno visokim temperaturama skoro sve supstance prelaze u plazmu.



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 1. OPŠTE FIZIČKE KARAKTERISTIKE

- Između agregatnih stanja prelazi se dovođenjem ili odvođenjem topline:
  - **kondenzacija**
  - **isparavanje**
  - **kristalizacija**
  - **topljenje**
  - **sublimacija**
  - **resublimacija**
- Fizičke karakteristike zavise i od strukture, tj. sastava, kao i od tehnologije materijala (npr. male promjene u sastavu → značajne promjene u električnoj provodnosti poluprovodnika, hemijska degradacija materijala → pojava defekata u njihovoj strukturi itd.)



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 2. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE

- Električna svojstva koja su uglavnom važna za karakterizaciju materijala za izradu provodnika, otpornika, kontakata itd. su:
  - električna otpornost
  - temperaturni koeficijent električne otpornosti
  - električna provodnost
- **Električna otpornost ( $\rho$ )** je svojstvo materijala koje se očitava prilikom prolaska električne struje.

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

$$\rho[\Omega m] = \frac{\Omega \cdot m^2}{m}$$

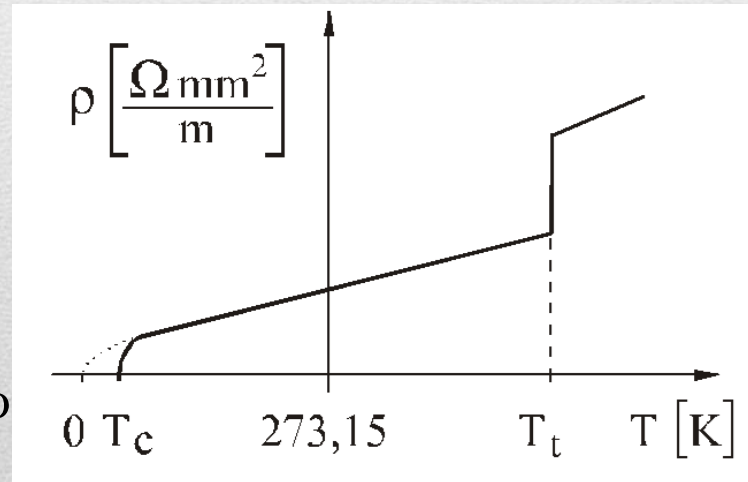
- Empirijska podjela materijala po električnoj otpornosti je:
  - izolatori  $> 10^{12} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$
  - poluprovodnici 10 do  $10^{12} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$
  - provodnici (metali)  $< 10 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 2. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE

- Pri temperaturi topljenja  $T_t$  metalu se skokovito mijenja električna otpornost. Većini metala u tački topljenja električna otpornost skokovito raste, mada ima i metala kod kojih u toj tački električna otpornost skokovito pada. Pri kritičnoj temperaturi  $T_c$  dolazi do naglog iščezavanja električne otpornosti (pojava superprovodnosti). Kritična temperatura bliska je apsolutnoj nuli (0K).
- Sredstvo kojim se materijal hladi do tako niskih temperatura je tečni helijum i ta tehnologija je veoma skupa, ali se pojava superprovodnosti počinje značajnije ekspanzovati otkrićem visokotemperaturnih superprovodnika (oko 1985. godine), kojima je kritična temperatura oko 100K. Na tim temperaturama za hlađenje se koristi tečni azot čija je tehnologija oko 100 puta jeftinija od tehnologije tečnog helijuma, što je omogućilo značajne primjene pojave superprovodnosti.



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 2. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE

- **Temperaturni koeficijent električne otpornosti ( $\alpha$ )** je mjera promjene električne otpornosti materijala sa promjenom temperature. Električna otpornost na temperaturi  $T$  izražava se kroz:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_0 (T - T_0)]$$

gdje je  $\rho_0$  otpornost pri temperaturi  $T_0$ (K).

- Jedinica za temperaturni koeficijent električne otpornosti je  $K^{-1}$ .
- **Električna provodnost ( $\gamma$ )** je recipročna vrijednost električne otpornosti.

$$\gamma = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{S} = G \cdot \frac{l}{S}$$

- Jedinica za električnu provodnost je S/m ili  $\mu Sm/mm^2$ .

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. TOPLOTNE KARAKTERISTIKE

- Termodinamika je naučna oblast koja se bavi proučavanjem odnosa toplote i rada. Zasniva se na opštim zakonima fizike, na osnovu kojih se može logičkim razmatranjima doći do zaključaka o svojstvima materijala i njihovim promjenama u ponašanju prilikom promjene same temperature.
- Dva osnovna pojma termodinamike su *temperatura* i *toplota*.
  - **Temperatura** je stepen toplotnog stanja nekog tijela. Prema SI sistemu, temperatura se izražava Kelvinovom temperaturnom skalom. Veza između Celzijusove, Kelvinove i Farenhajtove temperature:

$$t[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15$$

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273,15$$

$$t[^\circ\text{C}] = \frac{5}{9} t[^\circ\text{F}] - 32$$

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. TOPLOTNE KARAKTERISTIKE

- Dva tijela na različitim temperaturama dovedena u kontakt razmjenjuju toplotu sve do stanja termičke ravnoteže, pri čemu se toplota prenosi sa tijela više na tijelo niže temperature.



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. TOPLOTNE KARAKTERISTIKE

- *Provođenje (Kondukcija)* – prenošenje toplote u nekom elektrotehničkom materijalu sa toplijih na hladnije djelove materijala. Količina toplote se može izraziti:

$$Q = \frac{\lambda}{x} \cdot (T_1 - T_2) \cdot A \cdot \theta$$

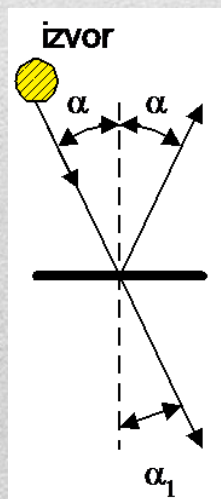
gdje je  $\lambda$  – koeficijent toplotne provodnosti ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $x$  - debljina zida (m),  $T_1$  i  $T_2$  - temperature na dvijema tačkama (K),  $A$  - površina zida ( $\text{m}^2$ ),  $\theta$  - vrijeme (s).

- *Strujanje (Konvekcija)* – kako tečnosti i gasovi slabije provode toplotu, ne mogu se zagrijavati samo provođenjem, već se pretežno zagrijavaju strujanjem. U tom slučaju dolazi do podizanja zagrijanijih slojeva i spuštanja hladnijih slojeva, čime se ostvaruje strujanje ugrijanog fluida.

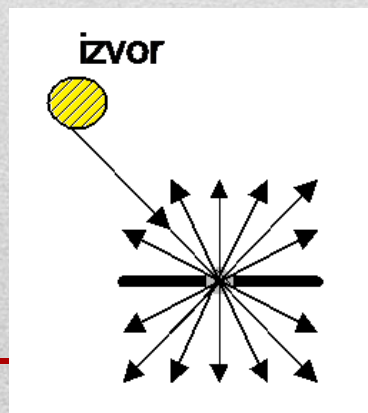
# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. TOPLOTNE KARAKTERISTIKE

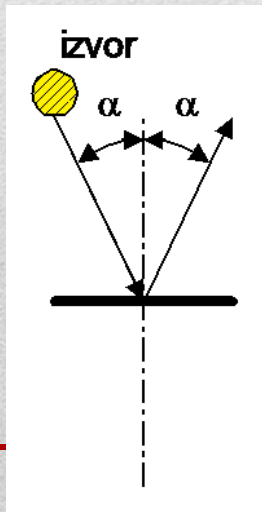
- *Zračenje (radijacija)* – pod toplotnim zračenjem podrazumijevamo elektromagnetno zračenje koje nastaje usljed postojanja temperature nekog tijela. Ono se ostvaruje putem elektromagnetnih talasa kao nosilaca energije, koji su iste prirode kao svjetlosni ili radio talasi.
- Brže se zagrijevaju tijela čije površine bolje apsorbiraju toplotno zračenje (npr. tamne i hrapave površine).
- Tijelo koje bi u potpunosti apsorbiralo cjelokupno toplotno zračenje koje na njega padne – apsolutno crno tijelo, koje u praksi ne postoji.



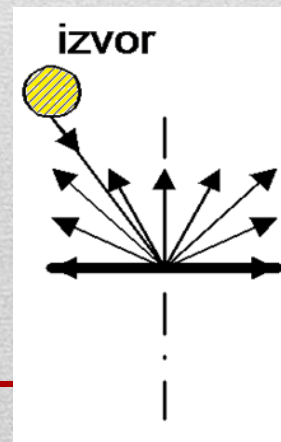
glatka površina



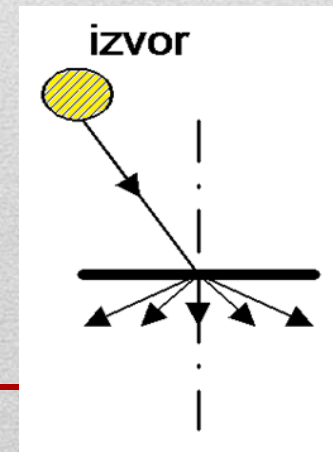
hrapava površina



površina ogledala



bijela površina



crna površina

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. TOPLOTNE KARAKTERISTIKE

- Ako nekom homogenom tijelu mase  $m$  dovedemo malu količinu toplote  $dQ$ , što njegovu temperaturu poveća za  $dt$ , tada je toplotni kapacitet tog tijela:

$$C = \frac{dQ}{dt}$$

- Ovako definisan toplotni kapacitet predstavlja toplotnu karakteristiku tijela nezavisnu od vrste materijala. Stoga, definišemo *specifični toplotni kapacitet* materijala  $c$ , koji predstavlja toplotnu karakteristiku materijala, kao toplotni kapacitet po jedinici mase:

$$c = \frac{C}{m}$$

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 3. TOPLOTNE KARAKTERISTIKE

SUPSTANCA	SPECIFIČNI TOPLOTNI KAPACITET, $c[\text{J/kg K } 10^{-3}]$	TEMPERATURN OBLAST, $T[\text{K}]$
Aluminijum	0,91	290-373
Mesing	0,39	288-373
Bakar	0,39	288-373
Staklo	0,83	293-373
Led	2,30	283-373
Gvožđe	0,47	291-373
Olovo	0,13	293-373
Živa	0,14	273-373
Srebro	0,23	288-373



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 4. HEMIJSKE KARAKTERISTIKE

- Hemijska istraživanja se odnose na promjenu sastava materijala, tzv. hemijske reakcije, koje se odvijaju u prirodi, laboratoriji, ili tokom tehnoloških procesa.
- Sa aspekta primjene materijala u elektrotehnici, najvažnije hemijske osobine su:
  - *Korozija* – destrukcija materijala koja je rezultat hemijskog dejstva. Brzina korozije zavisi od temperature i koncentracija reaktanata i njihovih produkata.
  - Korozija se može posmatrati kao jedna ili više nekontrolisanih hemijskih reakcija koje se odigravaju u smjeru suprotnom od onog koji je doveo do stvaranja ili prečišćavanja materijala.



# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 4. HEMIJSKE KARAKTERISTIKE

- *Oksidacija* – gotovo svi metalni i nemetalni materijali reaguju sa atmosferskim gasovima gradeći okside. Samo nekoliko čistih metala pronađenih u prirodi nisu podložni reakcijama ovog tipa. Tačnije, velika većina metalnih elemenata u prirodi postoji u rudama kao hemijsko jedinjenje. Metali dobijeni iz ruda teže da se rekombinuju sa kiseonikom ili drugim elementima iz atmosfere.
- Postoje različite tehnike koje se primjenjuju za zaštitu od oksidacije metala. Jedna od njih predstavlja i zaštitni sloj koji je otporan na oksidaciju i dobro prijanja uz površinu metala. Ovi slojevi mogu biti od silicijuma i aluminijuma.
- Legure imaju posebno dobru otpornost prema oksidaciji. Dodavanjem, na primjer, hroma ili aluminijuma u legure gvožđa, nikla ili kobalta, poboljšava se njihova otpornost na oksidaciju.

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 5. MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

- Mehaničke karakteristike materijala opisuju vezu između odziva tj. deformacije materijala i pobude tj. opterećenja na elektrotehnički materijal.
- U uslovima eksploatacije, materijali od kojih su izrađeni pojedini djelovi elektrotehničkih sklopova, često su izloženi dejstvu spoljašnjih sila. Kako usljed tog dejstva ne bi došlo do neželjenih promjena (*deformacija*) tih djelova, potrebno je da oni budu pravilno dimenzionisani, a to upravo podrazumijeva poznavanje mehaničkih osobina materijala.
- Najznačajnije mehaničke karakteristike materijala su:
  - *Čvrstoća*
  - *Elastičnost*
  - *Plastičnost*
  - *Viskoznost*
  - *Rastezljivost*
  - *Žilavost*
  - *Tvrdoća*

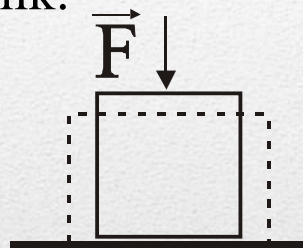
# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 5. MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

- Deformacije materijala (krutih tijela) vezanih za mehaničku karakteristiku materijala – *čvrstoću*, koja predstavlja svojstvo materijala da se opire spoljašnjoj sili koja mu nastoji promijeniti oblik:



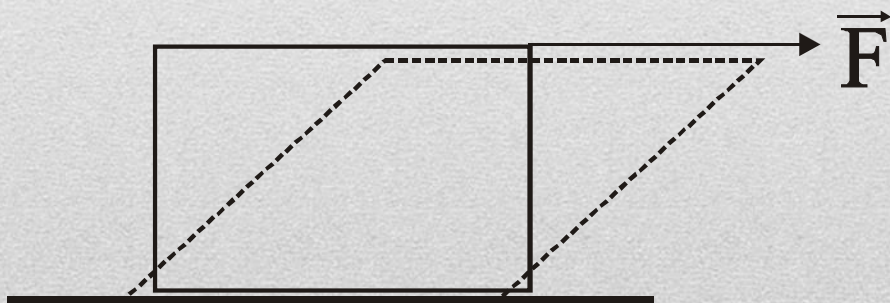
rastezanje



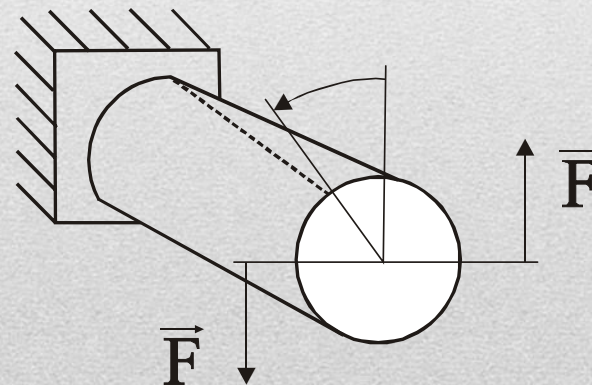
sabijanje



savijanje



smicanje

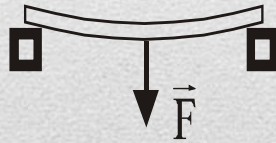


uvijanje

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 5. MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

- Deformacije materijala koje nastaju pod dejstvom spoljašnje sile mogu biti reverzibilne (*elastične*) i ireverzibilne (*plastične* i *viskozne*).
- Dok neki materijali zadržavaju elastična svojstva sve do tačke kidanja (npr. neke vrste keramike), mnogi materijali kao što su metali mogu pretrpjeti trajne deformacije i prije nego li dođe do kidanja. Dva najvažnija tipa trajnih deformacija su plastične deformacije, u slučaju materijala sa kristalnom strukturom i viskozne deformacije, u slučaju fluida.



Elastični materijal

Plastični materijal

stanje prije djelovanja sile

stanje poslije djelovanja sile

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 6. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE

- Tehnološke karakteristike daju informaciju o obradivosti materijala. Najvažnije među njima su:
    - **Sposobnost deformacije u hladnom i toplom stanju** (bez skidanja strugotine) je sposobnost materijala da se može valjati, kovati, izvlačiti, savijati itd. U ugrijanom stanju je potrebna manja energija za obradu.
    - **Sposobnost struganja** je mjerilo obradivosti materijala ručnim alatom i mašinama koje rade na principu skidanja strugotine.
    - **Zavarljivost i lemljivost** je sposobnost spajanja materijala zavarivanjem i lemljenjem. Zavarivanjem se spajaju metalne konstrukcije, a lemljivost predstavlja sposobnost spajanja dva materijala taljenjem trećeg.
    - **Sposobnost lijevanja** je sposobnost ispunjavanja kalupa složenih oblika rastopljenim materijalom. Lijevanjem se obrađuju metali, staklo, guma, plastika itd.
    - **Rezljivost** je sposobnost materijala da se može obrađivati rezanjem. Primjenjuje se kod obrade metala, plastika, drva itd.
-

# UVOD U KARAKTERISTIKE MATERIJALA U ELEKTROTEHNICI

## 7. MAGNETNE KARAKTERISTIKE

- Magnetne karakteristike opisuju ponašanje materijala u magnetnom polju.
- Svi materijali imaju u manjoj ili većoj mjeri magnetne karakteristike.
- Magnetne karakteristike materijala su posljedica uzajamnog dejstva magnetnih momenata atoma i molekula koji potiču od:
  - magnetnih momenata usljed kretanje elektrona po orbitama (orbitalnih magnetnih momenata),
  - momenata usljed sopstvene rotacije (magnetnih momenata spina) elektrona,
  - magnetnih momenata koji potiču od ostalih u čestica u atomima (spinovi jezgra atoma), koji su, uglavnom, zanemarljivi.

