

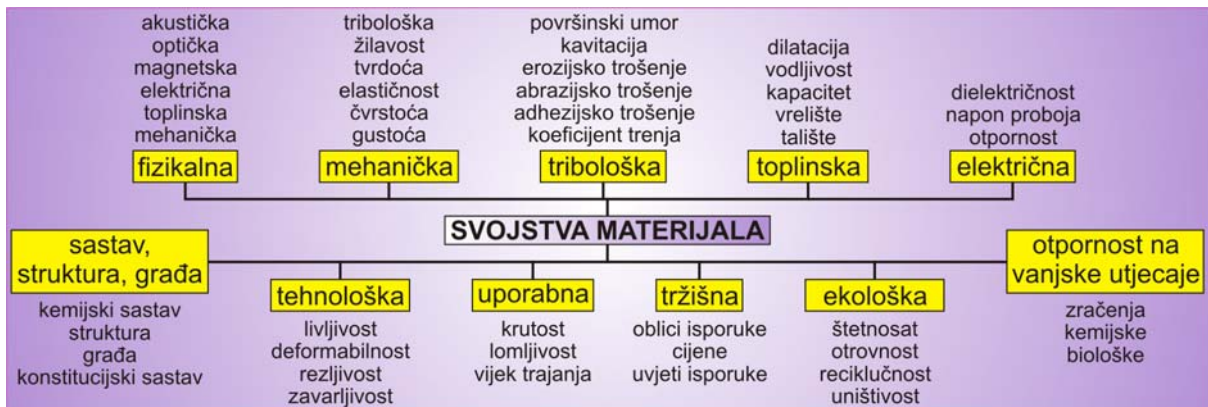
# 4. Svojstva, karakteristike i izbor materijala

<b>4.1 Svojstva i karakteristike materijala.....</b>	<b>35</b>
4.1.1 Izbor značajnih karakteristika materijala .....	36
4.1.2 Definicije značajnih karakteristika materijala .....	36
<b>4.2 Mehaničke karakteristike materijala .....</b>	<b>37</b>
4.2.1 Elastičnost .....	39
4.2.2 Čvrstoća.....	40
<b>4.3 Usporedba materijala.....</b>	<b>41</b>
4.3.1 Dijagramska usporedba .....	41
4.3.2 Tablična usporedba.....	42
<b>4.4 Izbor materijala .....</b>	<b>43</b>

## 4.1 Svojstva i karakteristike materijala

U ovom se odjeljku pod "materijalima" podrazumijevaju **konstrukcijski materijali**.

Zbog brojnosti materijala i raznolikosti njihovih svojstava teško je postaviti sveobuhvatnu klasifikaciju svojstava materijala (miris, okus). Necjelovito se svojstva mogu razvrstati:



Svojstva se materijala opisuju jednoznačnim ili kombiniranim "**karakteristikama**" koje su definirane u tehničkim normativima, a njihove se vrijednosti nalaze u literaturi u obliku:

- semikvantitativnih opisa i slika,
- dijagrama i matematičkih izraza, te
- jednoznačnih vrijednosti i tablica.

Često se karakteristike materijala moraju i odrediti/provjeriti provedbom u pravilu normiranih mjerenja/pokusa.

Treba imati u vidu da se namjerno/spontano svojstva materijala mijenjaju tijekom:

- prerade: sirovine ⇒ poluproizvodi ⇒ proizvodi i
- korištenja: umor (promjena mehaničkih svojstava), korozija (metala), otapanje (keramika), starenje (polimera), truljenje (biljni i životinjski prirodni materijali).

### 4.1.1 Izbor značajnih karakteristika materijala

Zbog obima je u ovoj knjizi nemoguće obuhvatiti sve karakteristike za sve materijale (izbor diktira namjena). Za sve su grupe materijala najčešće značajne karakteristike:

Karakteristika materijala		
naziv i oznaka	tvrdća po Vickersu	otpornost na: trošenje
kemijski sastav	dinamička izdržljivost	oksidaciju pri 500 °
građa	maksimalna radna temperatura	paljenje
gustoća	minimalna radna temperatura	ultra-ljubičaste zrake
vlačna čvrstoća	specifična toplina	slatku vodu
tlačna čvrstoća	toplinska vodljivost	morsku vodu
modul elastičnosti	toplinska rastezljivost	jake kiseline
Poissonov koeficijent	napon proboja	jake lužine
granica razvlačenja	električna otpornost	slabe kiseline
istezljivost	recikličnost	slabe lužine
lomna žilavost	cijena	organska otapala

Za pojedine su grupe materijala najčešće značajne karakteristike:

metali	keramike	polimeri	kompoziti	pjene	drva
Mt	Kr	Pl	Km	Pj	Dr

Karakteristika materijala	Mt	Kr	Pl	Km	Pj	Dr
Modul savijanja			⊕	⊕	⊕	⊕
Naprezanje zgušćivanja					⊕	
Otpornost na umor	⊕			⊕		
Poroznost		⊕		⊕		
Postotak punioca			⊕	⊕		
Različito skupljanje				⊕		⊕
Relativna gustoća				⊕	⊕	
Skupljanje pri sušenju						⊕
Stupanj anizotropnosti				⊕	⊕	
Temperatura postojanosti oblika	⊕	⊕		⊕		
Temperaturna ovisnost otpornosti	⊕					
Upojnost vode			⊕	⊕	⊕	
Veličina zrna		⊕		⊕		
Vrsta punioca			⊕	⊕		

### 4.1.2 Definicije značajnih karakteristika materijala

**Sastav**,  $w_i$ , %: pregled masenih sadržaja supstancija od kojih je formiran materijal.

**Gustoća**,  $\rho$ , kg/dm<sup>3</sup>: masa jedinice volumena materijala.

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ kg/dm}^3 \quad m - \text{masa materijala, kg} \\ V - \text{volumen materijala, dm}^3$$

**Vlačna čvrstoća**,  $R_m$ , N/mm<sup>2</sup> (= MPa): maksimalno naprezanje koje se može postići pri statičkom vlačnom opterećivanju normirane epruvete.

**Tlačna čvrstoća**,  $R_{m,t}$ , N/mm<sup>2</sup>: maksimalno naprezanje koje se može postići pri statičkom tlačnom opterećivanju normirane epruvete.

**Modul elastičnosti**,  $E$ , kN/mm<sup>2</sup>: omjer naprezanja i deformacija u elastičnom području.

**Poissonov koeficijent** (Poisson's Ratio),  $\nu$ , -: omjer radialne i aksijalne deformacije pri opterećivanju materijala:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}, - \quad \varepsilon_r - \text{radijalna deformacija } (\Delta D/D_0), - \\ \varepsilon_a - \text{aksijalna deformacija } (\Delta L/L_0), -$$

**Granica razvlačenja,  $R_e$ , N/mm<sup>2</sup>** : najniže vlačno naprežanje koje izaziva trajno istežanje normirane epruvete.

**Istežljivost,  $A$ , %** : deformacija normirane epruvete definiranih dimenzija pri pojavi loma.

**Lomna žilavost,  $K_{IC}$ , N/m<sup>3/2</sup>** : pokazatelj otpora materijala širenju pukotine.

**Tvrdoća po Vickersu,  $HV$ , –** : pokazatelj otpornosti materijala prodiranju normirane dijamantne piramide definiranih dimenzija, opterećene definiranom silom.

**Dinamička izdržljivost,  $R_{d, is}$  (is – istosmjerno), N/mm<sup>2</sup>** : najveće vlačno naprežanje do koga se normirana epruveta može istosmjerno opterećivati, a da pri tome izdrži beskonačan broj ciklusa bez pojave loma.

**Maksimalna radna temperatura,  $t_{Max}$ , °C** : iznad  $t_{Max}$  je materijal neupotrebljiv.

**Minimalna radna temperatura,  $t_{min}$ , °C** : ispod  $t_{Max}$  je materijal neupotrebljiv.

**Specifična toplina,  $c$ , J/(kg·K)** : količina topline potrebna da bi se jedinici mase materijala povećala temperatura za 1 K (= 1 °C) :

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$Q$  – dovedena toplina, J  
 $m$  – masa materijala, m<sup>2</sup>  
 $\Delta T$  – porast temperature, K

**Toplinska vodljivost,  $\lambda$ , W/(m·K)** : količina topline koja prolazi kroz jedinicu duljine vodiča topline od aktualnog materijala, po jedinici presjeka vodiča, po jedinici razlike temperatura na krajevima vodiča, u jedinici vremena:

$$\lambda = \frac{Q}{S \cdot \Delta T \cdot \Delta \tau} \cdot L, \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

$Q$  – dovedena toplina, J  
 $L$  – duljina vodiča, m  
 $S$  – površina presjeka vodiča, m<sup>2</sup>  
 $\Delta T$  – razlika temperatura krajevima vodiča, K  
 $\Delta \tau$  – vremenski interval, s

**Toplinska rastežljivost,  $\alpha$ , μm/(m·K)** : deformacija (linijska) komada od aktualnog materijala po jedinici porasta temperature:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T}, \text{ μm/(m} \cdot \text{K)}$$

$\Delta L$  – promjena duljine uslijed porasta temperature, μm  
 $\Delta T$  – porast temperature, K

**Napon proboja,  $E_k$ , MV/m** : razlika potencijala koja izaziva električni proboj materijala – skok je jakosti struje, u pravilu, praćen oštećenjem materijala.

**Električna otpornost,  $e_0$ , μΩ·cm** : električni napon potreban za uspostavljanje jedinice jakosti struje kroz električni vodič jedinične duljine i jediničnog presjeka:

$$\rho = \frac{U \cdot S}{I \cdot L}, \text{ μm/(m} \cdot \text{K)}$$

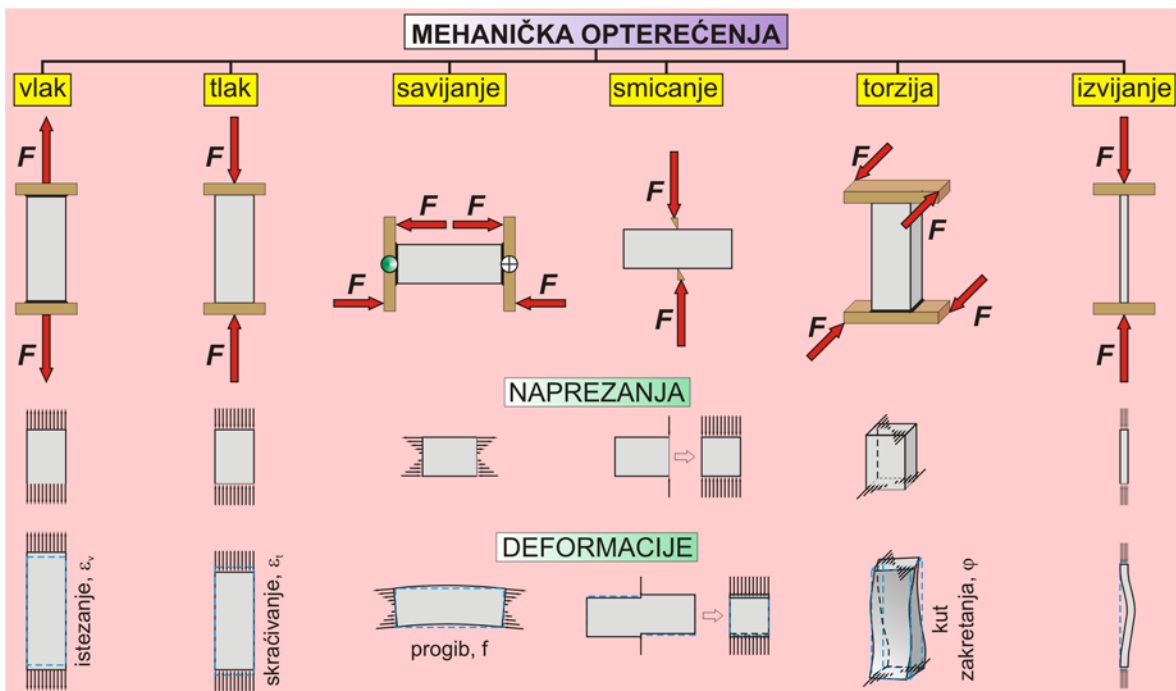
$U$  – električni napon, V  
 $I$  – jakost električne struje, I  
 $S$  – površina presjeka vodiča, m<sup>2</sup>  
 $L$  – duljina vodiča, m

**Recikličnost,  $w_R$  (= 0 ÷ 1), kg/kg** : maseni udio materijala koji se nakon isteka vijeka trajanja proizvoda može ponovno vratiti u uporabu.

**Cijena, – , kn/kg** : cijena po jedinici mase materijala.

## 4.2 Mehaničke karakteristike materijala

Mnogi su materijali tijekom uporabe izloženi različitim mehaničkim opterećenjima koja izazivaju različita naprežanja i različite deformacije.



Naprezanje i deformacije se opisuju različitim jednačbama, ovisno o vrsti opterećenja. Na primjer, pri vlaklu su naprezanje ( $\sigma_v$ ) i deformacija – istežanje ( $\varepsilon_v$ ) :

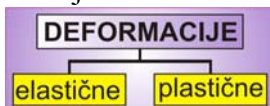
$$\sigma_v = \frac{F_v}{S}, \text{ N/mm}^2$$

$F_v$  – vlačna sila, N  
 $S$  – površina presjeka okomitog na silu,  $\text{mm}^2$

$$\varepsilon_v = \frac{L - L_0}{L_0}, \%$$

$L_0$  – duljina bez opterećenja, mm  
 $L$  – duljina pod opterećenjem, mm

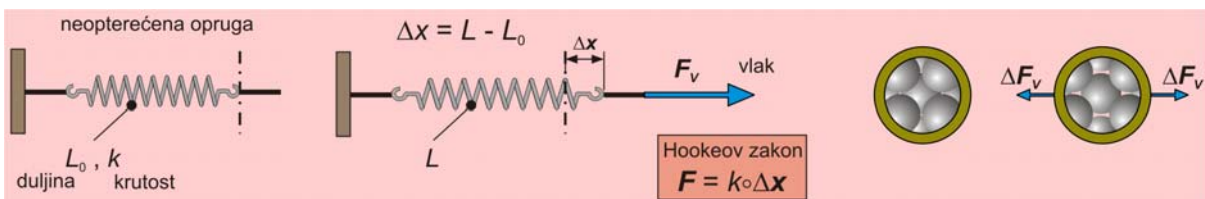
Razlikuju se:



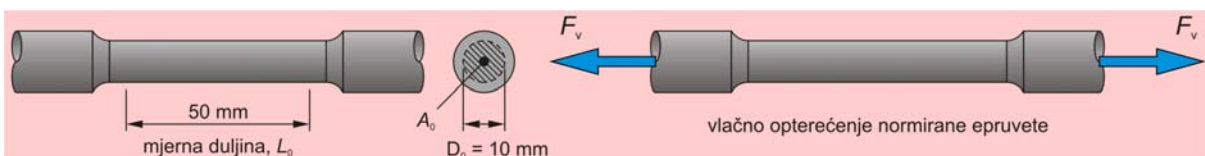
**Elastične deformacije** – deformirano tijelo po prestanku opterećenja poprima prvobitni oblik i dimenzije.

**Plastične deformacije** – deformirano tijelo po prestanku opterećenja ostaje trajno deformirano.

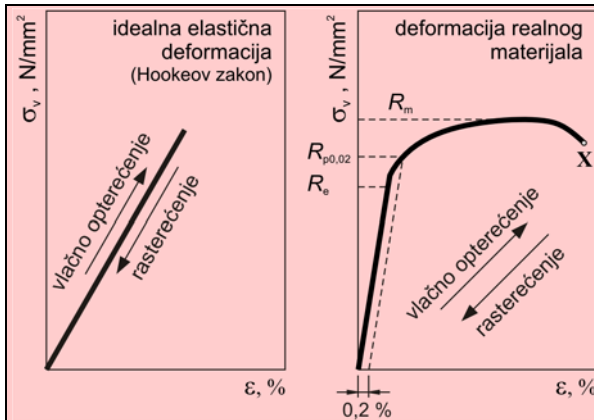
U području elastičnosti vrijedi **Hookeov zakon**, a konstanta  $k$  Hookeova zakona ovisi o prirodi materijala, te obliku i dimenzijama komada (različiti oblici i dimenzije opruga).



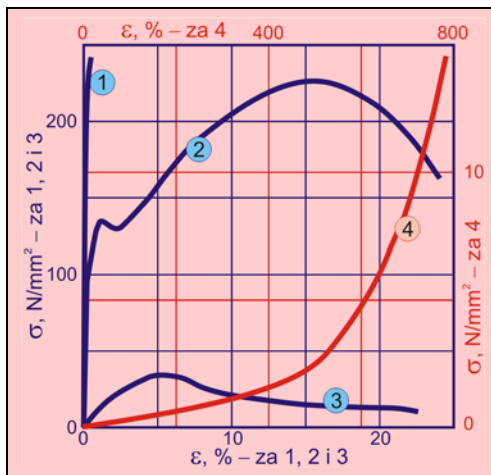
Ponašanje materijala pri mehaničkom opterećivanju može se ocijeniti na temelju **mehaničkih karakteristika** materijala koje se određuju provedbom mjerenja/pokusa u laboratorijima za ispitivanje materijala, s normiranim uzorcima (epruветama), na normiranim strojevima (kidalicama), po normiranim postupcima (**HRN, EN**).



Na temelju pokusa crtaju se dijagrami, npr. za vlačno opterećenje  $\sigma_v = f(\varepsilon)$ .

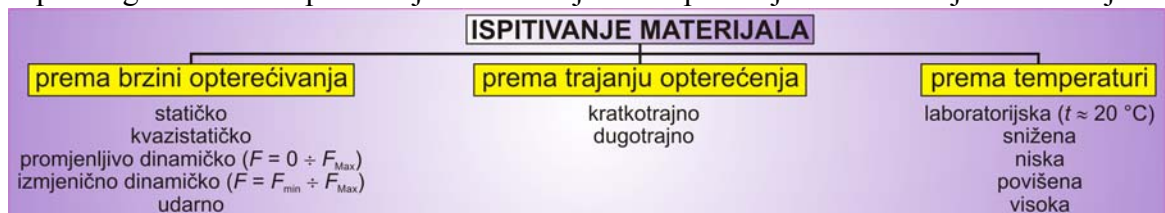


S porastom vlačne sile raste vlačno naprezanje (računa se s konstantnom, početnom površinom poprečnog presjeka epruvete) do:  
 $R_e$  – granice razvlačenja pri vlačnom opterećenju,  
 $R_{p,0,2}$  – konvencionalne granice razvlačenja – zaostaje  $\varepsilon = 0,2 \%$  nakon prekida vlačnog opterećenja,  
 $R_m$  – čvrstoće materijala pri vlačnom opterećenju.  
 U točki X dolazi do prekida epruvete.



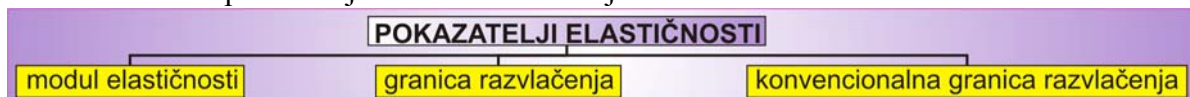
- Keramika** – aluminij-oksidi,  $Al_2O_3$ , krhka je i već pri vrlo malim deformacijama dolazi do pojave loma.
- Metal** – niskougljični čelik, ima relativno usko područje elastičnih deformacija i široko, manje ili više nepravilno područje plastičnih.
- Plastomer** – poli(etil-metakrilat) pri  $122 \text{ }^\circ\text{C}$ , ima sličnu ovisnost  $\sigma_v = f(\varepsilon)$  kao i metal, ali uz značajno niža vlačna naprezanja,
- Elastomer** – umrežena prirodna guma, u širokom je području elastična, ali ne vrijedi Hookeov zakon. U odnosu na metal, do prekida dolazi pri značajno manjim naprezanjima i većim deformacijama.

Pored vlačnih karakteristika, u laboratorijima se utvrđuju i druge karakteristike materijala pri drugim vrstama opterećenja. Prema uvjetima ispitivanja u laboratorijima razlikuju se:



### 4.2.1 Elastičnost

Osnovni su pokazatelji elastičnosti materijala:



#### Modul elastičnosti

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad \text{N/mm}^2$$

Izražava se kao pojedinačna vrijednost ili kao funkcija  $E = f(t)$ , s podatkom o vrsti opterećenja.

#### Primjena:

- metalni materijali, polimeri, keramike;

- proračun krutosti dijela pod djelovanjem vlačnog, tlačnog ili savojnog opterećenja u elastičnom području;
- usporedba različitih materijala.

### Granica razvlačenja

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \quad \text{N/mm}^2$$

Izražava se kao pojedinačna vrijednost ili kao funkcija  $R_e = f(t)$ , s podacima o tipu i debljini epruvete te brzini opterećivanja za polimerne materijale.

#### Primjena:

- metalni materijali s izraženim granicom razvlačenja, polimerni materijali;
- proračuni dimenzija;
- usporedba različitih materijala i kontrola kvalitete.

### Konvencionalna granica razvlačenja

$$R = \frac{F}{S_0}, \quad \text{N/mm}^2$$

Naprežanje koje nakon rasterećenja ostavlja trajnu deformaciju koja se zadaje u postocima početne mjerne duljine, npr.  $x = 0,2 \%$ . Izražava se kao pojedinačna vrijednost ili kao funkcija  $R_{p,x} = f(t)$ .

#### Primjena:

- metalni materijali bez izražene granice razvlačenja;
- proračuni dimenzija;
- usporedba materijala.

### Istezljivost

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad \%$$

$L_u$  – konačna duljina epruvete pri pojavi loma, mm  
 $L_0$  – početna duljina epruvete, mm

Izražava se kao pojedinačna vrijednost, pri čemu je:

$$A = A_5 - \text{za kratke epruvete s } L_0 = 5 \cdot d_0 \quad A = A_{10} - \text{za duge epruvete s } L_0 = 10 \cdot d_0$$

Uz rezultate se navode podaci o: brzini opterećivanja za plastomere, keramike i stakla, obliku epruvete za elastomere i stakla, te o dimenzijama i načinu prihvata epruvete za stakla.

#### Primjena:

- metalni materijali, plastomeri i elastomeri.

## 4.2.2 Čvrstoća

### Vlačna čvrstoća

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad \text{N/mm}^2$$

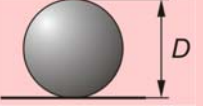
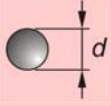
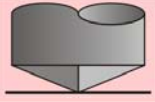
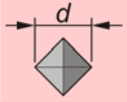
Izražava se kao pojedinačna vrijednosti ili kao funkcija  $R_m = f(t)$ , s podacima o brzini opterećenja za plastomere, keramike i stakla, obliku epruvete za elastomere i stakla, te o dimenzijama i načinu prihvata epruvete za stakla.

#### Primjena:

- metalni materijali, plastomeri i elastomeri, keramički materijali i stakla;
- usporedba materijala;
- kontrola i osiguranje kvalitete (toplinska obrada materijala);

- klasifikacija metalnih materijala;
- analiza šteta (greške u materijalu);
- orijentacijsko izračunavanje Vickersove i Brinellove tvrdoće;
- procjena zavarljivosti i lemljivosti (osnovni i dodatni materijal).

### Tvrdoća

Postupak	Utiskivano tijelo	Otisak	Formula
Brinell			$HB = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left[ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers			$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d_1^2}$

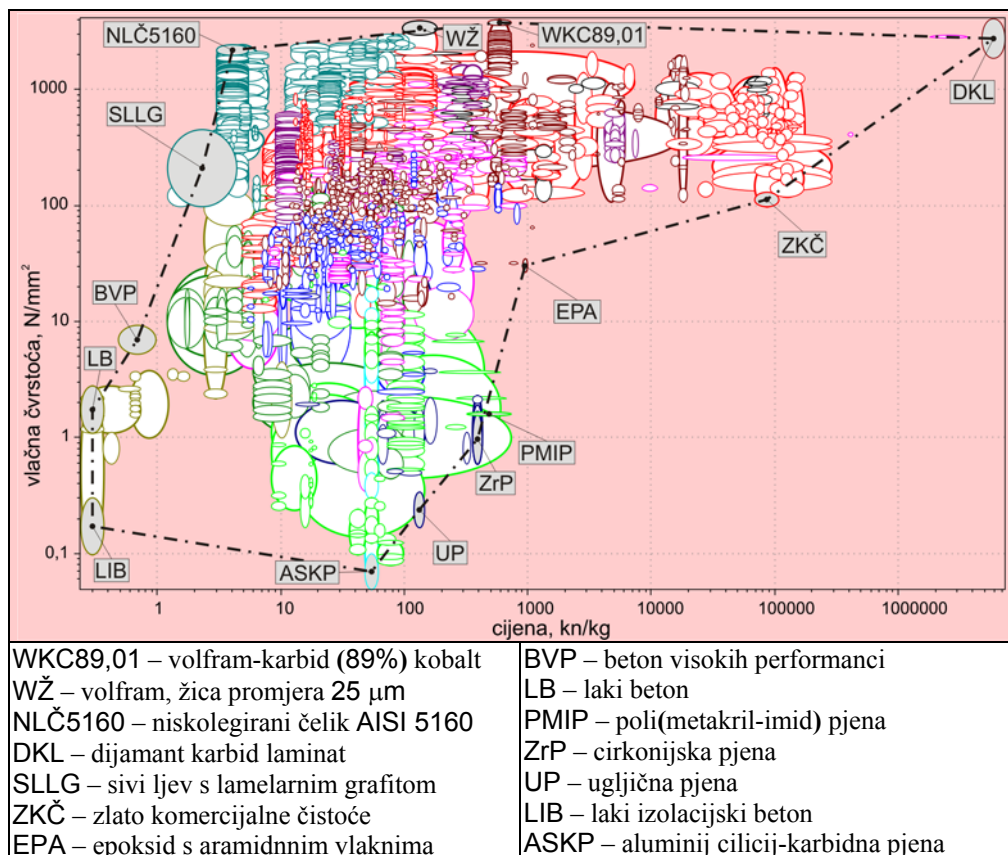
## 4.3 Usporedba materijala

Svojstva se materijala uspoređuju dijagramski (preglednije) i tablično (točnije).

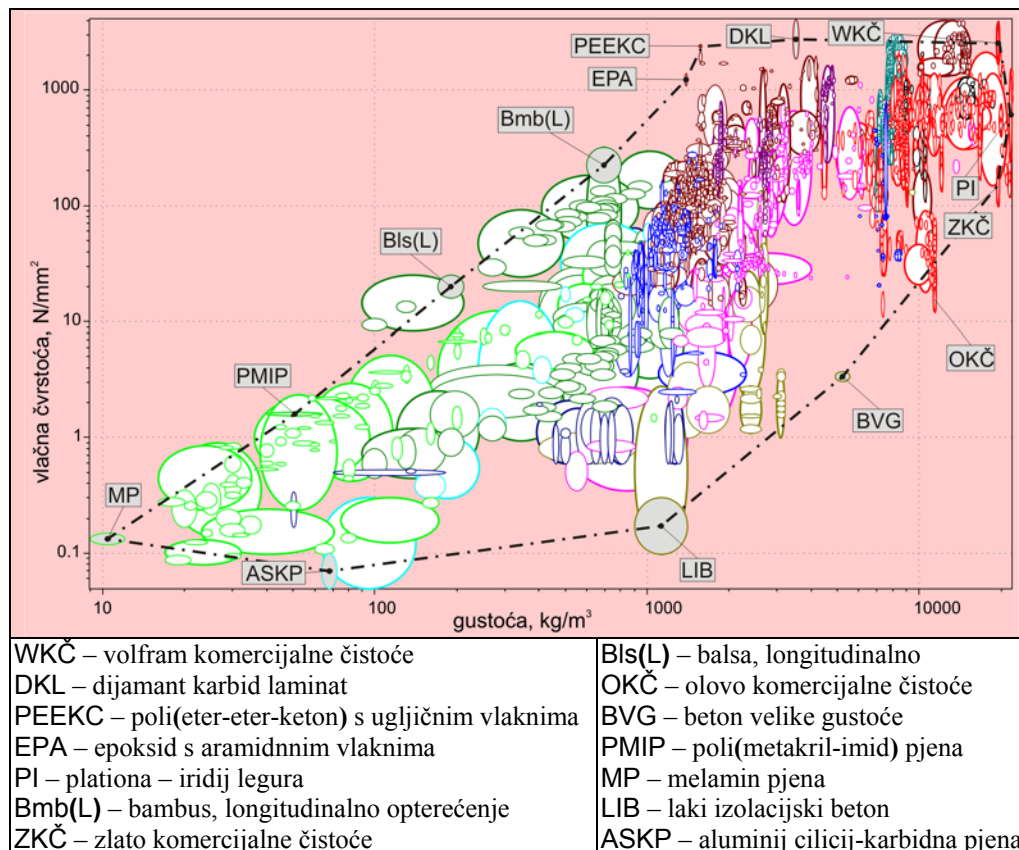
### 4.3.1 Dijagramska usporedba

Na dijagramima s osima: (a) cijena – vlačna čvrstoća i (b) gustoća – vlačna čvrstoća uspoređuju se svojstva velikog broja različitih materijala (program CES). Klikom na neko od obuhvaćenih polja ulazi se u datoteke s brojnim informacijama o odabranom materijalu.

#### (a) Cijena – vlačna čvrstoća



(b) Gustoća – vlačna čvrstoća



### 4.3.2 Tablična usporedba

Za usporedbu su prikazane karakteristike (datoteke CES) šest materijala različitih vrsta:

Materijal	hrast		ugljični čelik	cement	polietilen	poliester s vlaknima stakla
	Quercus falcata		AISI 1020	Portland	PE	
Sastav, masenih %	L longitudinalno	T transverzalno	0,17÷0,23 C 3÷6 Mn <0.04P <0.05S	64÷67 CaO 17÷25 SiO <sub>2</sub> 3÷8 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ...	CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub>	
$\rho$ , kg/dm <sup>3</sup>	0,69÷0,84		7,8÷7,9	3÷3,2	0,917÷0,932	1,6÷2,0
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	105÷128	5,2÷6,4	355÷435	1,9÷2,1	13,3÷26,4	207÷345
$R_{m,t}$ , N/mm <sup>2</sup>	54÷66	7,8÷9,5	265÷325	18,7÷20,7	10,8÷17,4	172÷345
$E$ , kN/mm <sup>2</sup>	16÷19	2,7÷3,0	205÷215	40,2÷41,6	0,17÷0,28	14,1÷31
$\nu$ , –	0,35÷0,40	0,02÷0,04	0,29÷0,30	0,20÷0,24	0,44÷0,46	0,31÷0,35
$R_e$ , N/mm <sup>2</sup>	55÷67	3,1÷3,8	265÷325	1,9÷2,1	5,3÷10,6	166÷276
$A$ , %	1,8÷2,2	0,6÷0,7	28÷43	0	100÷650	1÷2
$K_{IC}$ , N/mm <sup>3/2</sup>	210÷250	19÷23	1330÷2120	11÷14	38÷107	338÷661
$HV$	8,1÷9,8	5,9÷7,2	110÷130	5,6÷6,2	2,7÷4,4	49,7÷82,8
$R_{d,IS}$ , N/mm <sup>2</sup>	33÷41	1,6÷1,9	207÷240	0,90÷1,41	5,3÷10,6	82,8÷138
$t_{Max}$ , °C	120÷–140		340÷356	627÷857	81÷95	173÷189
$t_{min}$ , °C	–70÷–20		–68÷–43	–163÷–173	–123÷–73	–123÷–73
$c$ , J/(kg·K)	1660÷1710		465÷505	813÷867	1842÷1916	1167÷1214
$\lambda$ , W/(m·K)	0,33÷0,40	0,12÷0,15	50÷54	0,8÷0,9	0,32÷0,35	0,65÷0,68
$\alpha$ , $\mu$ m/(m·K)	60÷11	33÷44	11,5÷12,5	8,7÷9,1	180÷396	27÷54
$E_k$ , MV/m	0,4÷0,6	1÷2	0,4÷0,6	15÷22	17,7÷39,4	13,8÷19,7



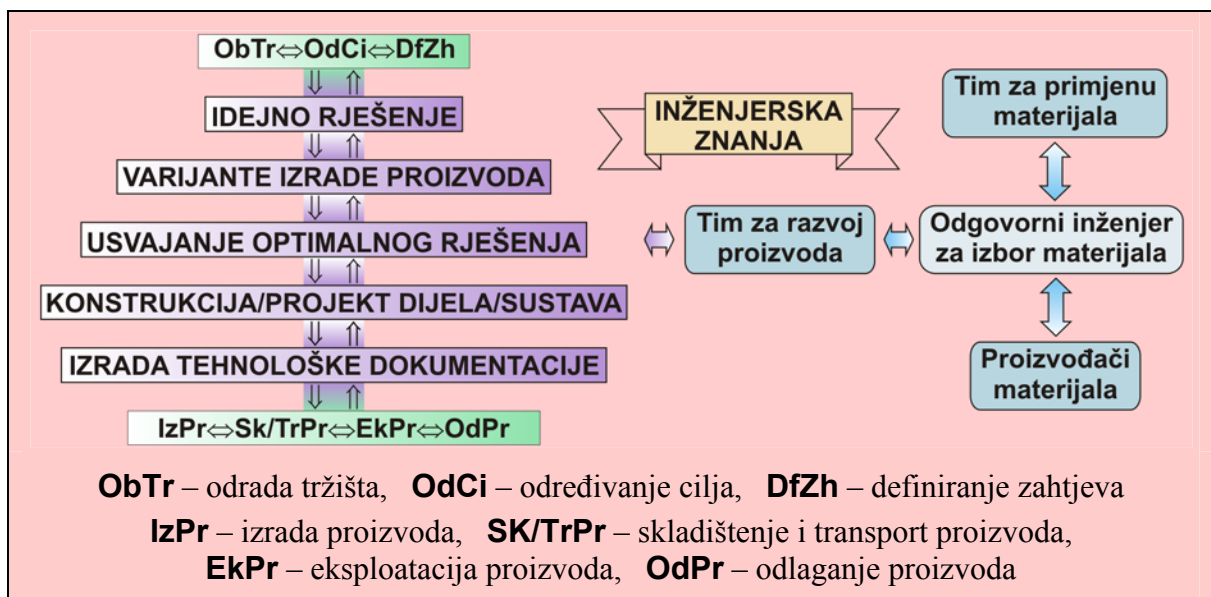
$\epsilon_0$ , G $\Omega$ ·cm	0,06÷0,2	0,2÷0,7	16÷18	$2 \cdot 10^{11} \div 2 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10^{24} \div 3 \cdot 10^{25}$	$10^{18} \div 10^{19}$
$w_R$	0,4÷0,5		0,8÷0,9	0,05÷0,10	0,45÷0,55	0,018÷0,022
Cijena, kn	9÷12		3,0÷5,5	0,60÷0,72	9,9÷10,9	59÷66
Otpornost na:						
trošenje	slaba		vrlo dobra	slaba	srednja	srednja
oksidaciju (500°C)	vrlo slaba		dobra	srednja	vrlo slaba	vrlo slaba
paljenje	slaba		vrlo dobra	vrlo dobra	slaba	slaba
UV zrake	dobra		vrlo dobra	vrlo dobra	slaba	vrlo dobra
slatku vodu	srednja		dobra	vrlo dobra	vrlo dobra	vrlo dobra
morsku vodu	srednja		srednja	dobra	vrlo dobra	vrlo dobra
jake kiseline	vrlo slaba		slaba	slaba	dobra	srednja
jake lužine	slaba		srednja	slaba	dobra	srednja
slabe kiseline	srednja		srednja	srednja	vrlo dobra	vrlo dobra
slabe lužine	dobra		dobra	dobra	dobra	srednja
organska otapala	dobra		vrlo dobra	vrlo dobra	srednja	srednja
Materijal	hrast		ugljični čelik	cement	polietilen	poliester sa vlaknima stakla
	Quercus falcata		AISI 1020	Portland	PE	

## 4.4 Izbor materijala

U pravilu je **odgovorni inženjer za izbor materijala** tijekom razvoja proizvoda uključen u sve faze iterativnog postupka systemske analize – konstruiranja/projektiranja dijela/sustava, imajući u vidu da ponašanje materijala ovisi o:

- svojstvima materijala,
- konstrukcijskim rješenjima i tehnologijama izrade/izvedbe dijelova/sustava te
- uvjetima u kojima se koristi dio/sustav.

Odgovorni inženjer, prije svega, temeljitom **kvalitativnom analizom** utvrđuje popis svih značajnih svojstava materijala. Ako se temeljita kvalitativna analiza preskoči, ili se moraju kvantitativno odrediti sva svojstva materijala (što je besmisleno) ili se manje-više nasumično odabire i kvantitativno određuje samo dio svojstava (što je opasno).



Tim za primjenu materijala tijekom razvoja proizvoda koristi računalnu podršku koja obuhvaća potrebne baze podataka i pogodne programe za izbor materijala.



U pravilu, osobito je značajan zahtjev minimalne cijene materijala, odnosno ukupnih jediničnih **troškova**:

$$t_u = t_1 \cdot m + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \quad \text{kn/proizvodu}$$

gdje je:  $t_1$  – troškovi nabavke samog materijala (svi prateći troškovi, transport, carina, akciza, skladištenje), kn/kg,

$m$  – masa materijala potrebna za izradu jednog proizvoda, kg/proizvodu,

$t_2$  – troškovi izrade jednog proizvoda od aktualnog materijala, kn/proizvodu,

$t_3$  – troškovi korištenja proizvoda (vezani za materijal, npr. podmazivanje, zaštita od korozije) tijekom vijeka trajanja proizvoda (pogon, održavanje, popravke), kn/proizvodu,

$t_4$  – troškovi zbrinjavanja (recikliranje/odlaganje) materijala nakon isteka vijeka trajanja proizvoda, kn/proizvodu,

$t_5$  – nepredvidljivi troškovi (iskustveni podatak), npr. 5 % od  $t_u$ , kn/proizvodu.

Teško je izračunati točne ukupne troškove, ali se pogodnim eliminacijama zajedničkih troškova lako dolazi do usporedivih procjena.

U fazi **kvantitativnih proračuna** dijela/sustava, bira se materijal s vrijednostima svojstava optimalno usklađenim sa zahtijevanim vrijednostima svojstava sa stajališta proizvoda. U pravilu su prihvatljive razlike u pozitivnom području – vrijednost svojstva materijala pogodnija je od zahtijevane, sa stajališta proizvoda. Na primjer, materijal ima veći modul elastičnosti (proizvod se pod opterećenjem manje deformira) ili manju gustoću (manja masa proizvoda).

Svojstva materijala		Zahtjevane vrijednosti svojstava materijala sa stajališta proizvoda	Vrijednosti svojstava za aktualni materijal	Razlike - +
MEHANIČKA	gustoća modul elastičnosti -			
FIZIKALNA	električna otpornost toplinska vodljivost -			
OTPORNOST NA VANJSKE UTJECAJE	otpornost na eroziju otpornost na koroziju -			
...	.....	.....	.....	.....

Razlike u negativnom području mogu se otkloniti izmjenama konstrukcijskih parametara dijela/sustava. Na primjer, povećavaju se dimenzije proizvoda jer se proizvodi većih dimenzija manje deformiraju, ali imaju veću masu. Isti se učinak postiže i uvođenjem ojačanja (u pravilu se mijenja i tehnologija izrade) kojima se deformacije održavaju u zahtijevanim granicama uz nepromijenjenu masu proizvoda.