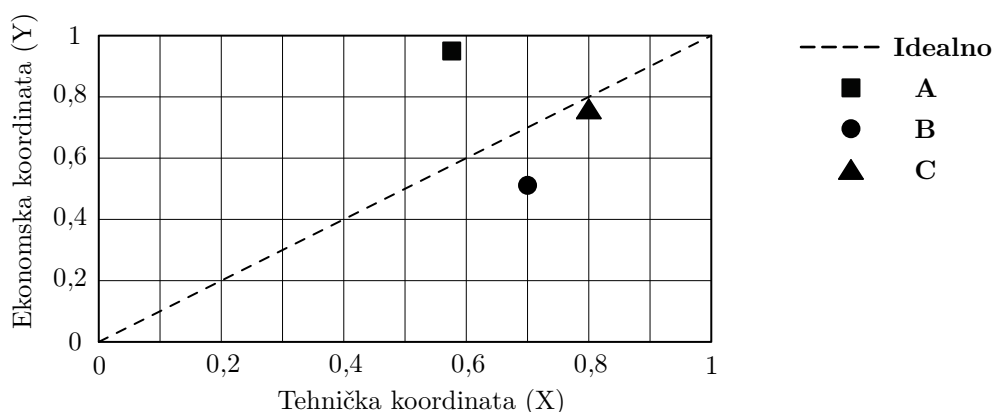


RAZRADA USVOJENOG KOMPROMISNOG REŠENJA

Embrion svakog proizvoda nalazi se u ideji o stvaranju proizvoda određenih performansi (tehničkih karakteristika). U procesu konstruisanja zamišljeni proizvod se razrađuje kroz faze konstruisanja:

1. Definisanje projektnog zadatka
2. Koncipiranju tehničkog rešenja
3. Razrada tehničkog rešenja
4. Kompletiranje tehničke dokumentacije.

U prvom delu predmeta **Osnove konstruisanja** razrađene su prve dve faze. Izlaz iz ove dve faze je izbor kompromisnog tehničkog rešenja na osnovu tehno-ekonomске analize više varijantnih rešenja (Slika 1).



Slika 1 Izbor kompromisnog tehničkog rešenja

U sledećoj fazi, fazi br. 3, svim izvršiocima elementarnih i parcijalnih funkcija, u okviru izabranog kompromisnog tehničkog rešenja, treba definisati oblik i dimenzije uvažavanjem sledećih uslova:

- | | | |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| o funkcije i namene | o pouzdanosti | o ekologije |
| o čvrstoće | o racionalnosti mase | o tehnologije izrade |
| o krutosti | o ergonomije | o bezbednosti |
| o stabilnosti | o ekonomičnosti | o dizajna. |

Sve mašinske konstrukcije, ma koliko bile različite po obliku, dimenzijama i nameni, imaju veliki broj sličnih ili istih izvršioca elementarnih ili parcijalnih funkcija. Njihove dimenzije i oblici su standardizovani, unificirani ili tipizirani. Zato izabranom kompromisnom rešenju prvo treba identifikovati ove izvršioce elementarnih i parcijalnih funkcija. Oblici i dimenzije izvršioca elementarnih funkcija prvo se definišu sa aspekta njihove funkcije i namene.

Sledeći kriterijum po važnosti koji diktira oblik i dimenzije izvršiocima elementarnih funkcija je uslov čvrstoće. Da bi izvršioци elementarnih funkcija obavljali svoju funkciju ispravno oni moraju imati potrebnu čvrstoću protiv zapreminskog i površinskog razaranja. Definisanje oblika i dimenzija izvršioca elementarnih funkcija sa aspekta čvrstoće sledi na osnovu tzv. **prethodnog proračuna**, iz poznatog uslova:

$$\sigma \leq \sigma_{doz}$$

$$\tau \leq \tau_{doz}$$

gde su:

- o σ i τ radni naponi (normalni i tangencijalni) u kritičnom poprečnom preseku mašinskog dela,

- σ_{doz} i τ_{doz} dozvoljeni naponi (normalni i tangencijalni):

$$\sigma_{doz} = \frac{[\sigma]_M}{S}, \quad \tau_{doz} = \frac{[\tau]_M}{S}.$$

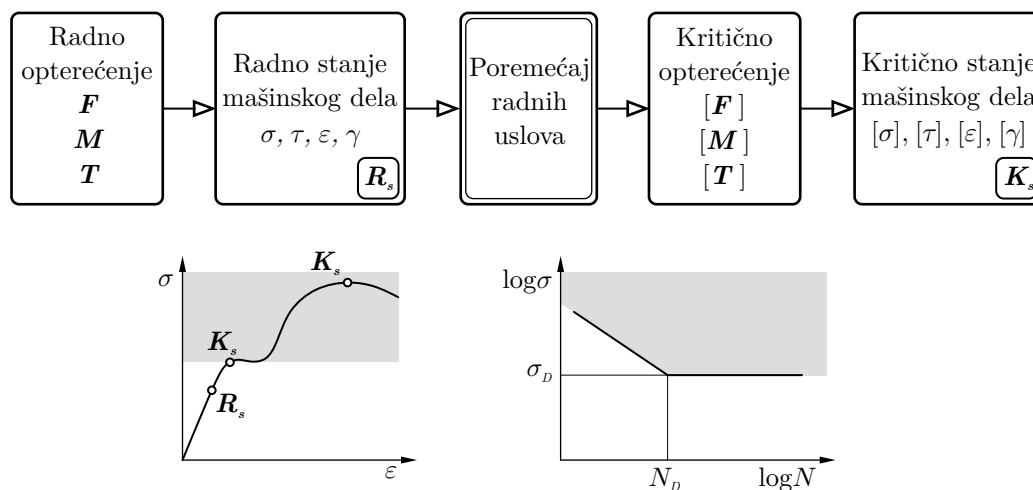
U gornjem izrazu figurišu sledeće veličine:

- $[\sigma]_M$ i $[\tau]_M$ kritični naponi (normalni i tangencijalni) mašinskog dela – izvršioca elementarne funkcije,
- stepen sigurnosti.

Radni naponi σ i τ se određuju zavisno od vrste naprezanja prema poznatim izrazima iz **Otpornosti materijala**. Pored prethodnog proračuna koji se koristi za definisanje oblika i dimenzija izvršioca elementarnih funkcija postoji i tzv. **završni proračun** koji je integralni deo tehničke dokumentacije. U ovom proračunu vrši se detaljna analiza radne sposobnosti izvršioca elementarnih funkcija.

Izbor stepena sigurnosti

Pri analizi radne sposobnosti mašinskih konstrukcija ne može se teorijski u potpunosti sagledati ponašanje mašinskih delova i sklopova u radnim i kritičnim uslovima, bez odgovarajućih ispitivanja na realnim delovima, sklopovima i mašinskim konstrukcijama ili njihovim prototipovima i modelima. Svaki radni uslov (radno stanje – R_s) pod određenim okolnostima može preći u granični – kritični uslov (kritično stanje – K_s) koji dovodi do neke kritične pojave mašinskog dela (statički ili dinamički lom, plastične deformacije, gubitak stabilnosti, velike elastične deformacije, zagrevanje, itd.).



Slika 2

Da bi mašinska konstrukcija koja obavlja opštu funkciju sistema, njen sklop ili deo, ispravno i bezbedno radili (bez otkaza), potrebno je da radni uslovi, kvantifikovani u vidu opterećenja, deformacije, brzine, temperature, ne dostignu vrednosti kritičnih uslova, tj. potrebno je ispuniti sledeći uslov:

$$S = \frac{\text{Kritični uslov}}{\text{Radni uslov}} > 1,$$

pri čemu je vrednost stepena sigurnosti:

$$S = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots,$$

gde su:

- p_1 – stepen pouzdanosti određivanja radnog opterećenja,
- p_2 – stepen pouzdanosti određivanja kritičnog opterećenja,
- p_3 – uslovi bezbednosti (rizik po ljude i okolinu koji postoji u slučaju otkaza izvršioca elementarne funkcije),

Odnosom intenziteta veličine koja opisuje neki kritični uslov i intenziteta veličine koja opisuje koreponentni radni uslov definisan je **stepen sigurnosti** protiv neke neželjene – kritične pojave. Stepenn sigurnosti pokazuje koliko je radno stanje R_s udaljeno od kritičnog stanja K_s . Poznavanjem intenziteta veličina koje opisuju radne i kritične uslove mogu se odrediti stepeni sigurnosti tj. može se proveriti radna sposobnost mašinskih delova i sklopova prema sledećim kriterijumima:

- o kriterijum nosivosti: $S = \frac{[F]}{F}$
- o kriterijum stabilnosti: $S = \frac{[\omega]}{\omega}$
- o kriterijum deformacija: $S = \frac{[\varepsilon]}{\varepsilon}$
- o kriterijum zagrevanja: $S = \frac{[\theta]}{\theta}$

gde su $[F]$, $[\varepsilon]$, $[\omega]$ i $[\theta]$ kritične vrednosti opterećenja, deformacija, ugaone brzine i temperature, respektivno, a F , ε , ω i θ radni uslovi istih veličina.

Kriterijum nosivosti definisan izrazom:

$$S = \frac{[F]}{F},$$

može se napisati i u sledećem obliku:

$$S = \frac{[\sigma]}{\sigma} \qquad S = \frac{[\tau]}{\tau} \qquad S = \frac{[p]}{p}$$

gde su: $[\sigma]$, $[\tau]$ i $[p]$ kritični naponi (normalni, tangencijalni i kontaktni), a σ , τ i p radni naponi (normalni, tangencijalni i kontaktni). Opšte preporuke za minimalne vrednosti stepena sigurnosti nekih mašinskih elemenata i njihovih kritičnih pojava date su u Tabeli 1.

Tabela 1 Minimalne vrednosti stepena sigurnosti

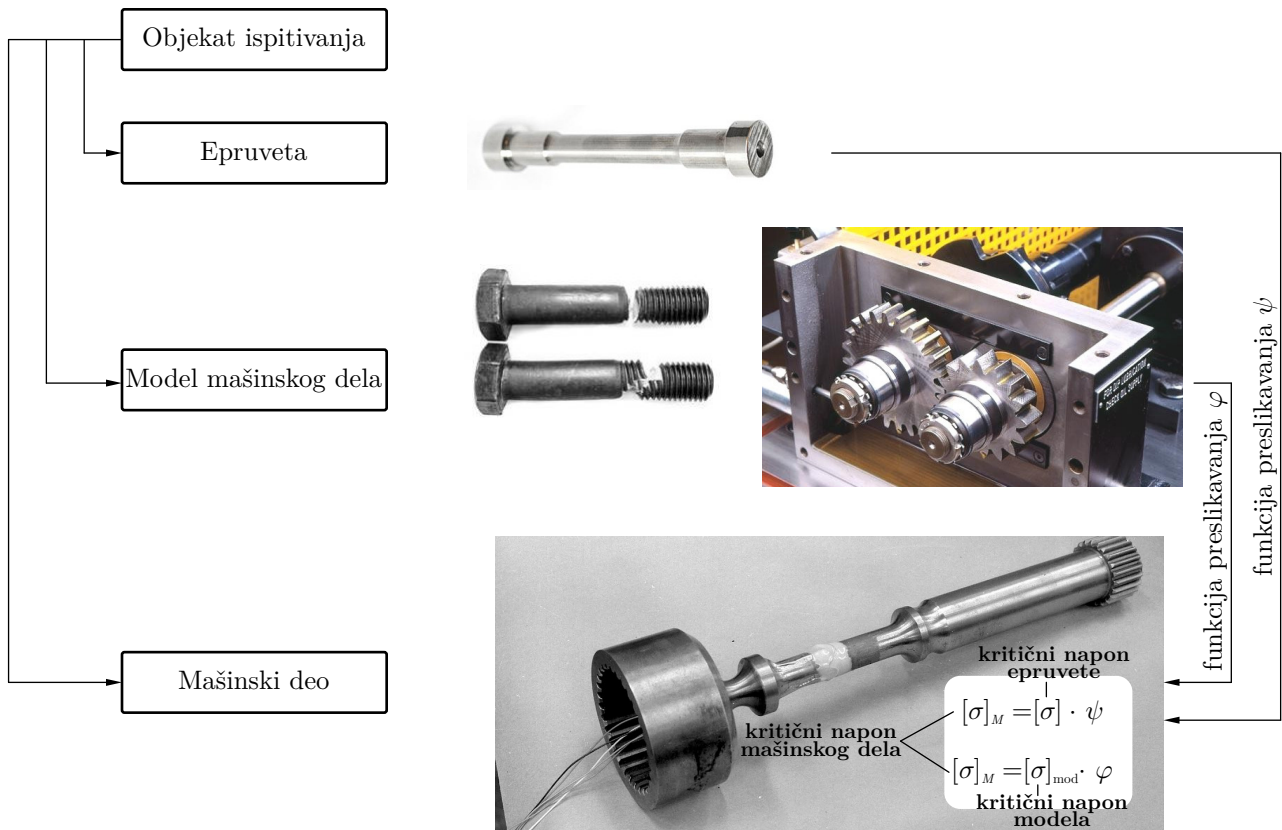
Mašinski deo	Zupčanik	Vratilo	Zavrtanj		Presovani spoj
			Podrešen	Nepodrešen	
S_{\min}	1,25	1,50	1,50	1,25	1,10

Izbor materijala – Kritičnog napona

Izbor materijala i odgovarajućeg kritičnog napona vrši se na osnovu kritičnog stanja, a to je stanje kada mašinski deo ne može da obavlja elementarnu funkciju:

- o elastične deformacije
- o plastične deformacije
- o statički lom
- o dinamički lom
- o habanje
- o zagrevanje
- o velike vibracije
- o velika buka

Do kritičnog napona mašinskih delova može se doći ispitivanjem epruveta, modela mašinskih delova ili ispitivanjem samih mašinskih delova, Slika 3.



Slika 3 Određivanje kritičnih napona mašinskog dela

Kritični naponi mašinskih delova

Mehaničke karakteristike materijala dobijene ispitivanjem mašinskih delova (kritični naponi mašinskih delova) razlikuju se, u većoj ili manjoj meri, od mehaničkih karakteristika dobijenih ispitivanjem standardnih epruveta. Najpouzdanije mehaničke karakteristike mašinskih delova dobijaju se njihovim ispitivanjem na uređajima koji dosledno reprodukuju radne uslove. Reprodukovanje radnih uslova na uređaju za ispitivanje veoma je teško ostvariti, a ispitivanje velikog broja mašinskih delova i elemenata (različitih po obliku i dimenzijama) je kompleksan posao koji ekonomsku opravdanost može naći samo kod vitalnih delova izuzetno odgovornih mašinskih konstrukcija. Imajući sve ovo u vidu, do mehaničkih karakteristika mašinskih delova i elemenata može se doći primenom sledećih postupaka:

- o primenom kratkotrajnih ubrzanih ispitivanja pri kojima su uslovi ispitivanja znatno stroži nego stvarni uslovi rada;
- o ispitivanjem modela mašinskih delova primenom zakona potpune geometrijske sličnosti i - Košijevog zakona, po kojem model i realan objekat imaju istu radnu sposobnost (isti stepen sigurnosti);
- o korišćenjem podataka na osnovu ispitivanja etalon-mašinskih delova, kao što su vijak, ležaj, zupčanik, remen, lanac itd., koji važe za određene radne uslove. Primenom korekcionih faktora – faktora radnih uslova analitičkim putem se može doći do podataka o mehaničkim karakteristikama mašinskih delova za odgovarajuće radne uslove;
- o korišćenjem podataka dobijenih ispitivanjem standardnih epruveta i primenom odgovarajućih korekcionih faktora može se doći do podataka o mehaničkim karakteristikama mašinskih delova, kao što su osovine, vratila, razni nosači itd.

Kritični naponi mašinskih delova u statičkim uslovima rada

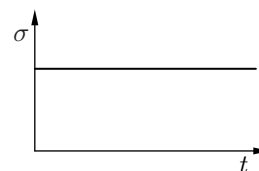
Statički uslovi mašinskog dela određeni su sledećim uslovima:

Prvi slučaj

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_d}{\sigma_g} = 1 \text{ i } \sigma_a = 0$$

gde su:

R_{σ} – faktor asimetrije napona, σ_g – gornja vrednost napona,
 σ_d – donja vrednost napona, σ_a – amplituda napona.

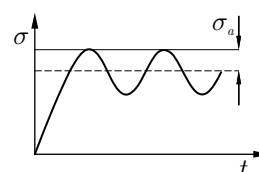


Drugi slučaj

$$R_{\sigma} \neq 1, \sigma_a \neq 0, \sigma_{\max} = \alpha_k \cdot \sigma < \sigma_{TM}, n < 10^3 \dots 10^4$$

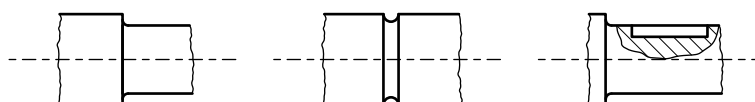
gde su:

σ – nominalni napon,
 α_k – geometrijski faktor koncentracije napona,
 n – broj promena napona,



σ_{TM} – napon tečenja mašinskog dela.

Statički kritični naponi mašinskih delova razlikuju se od statičkih kritičnih napona standardne epruvete. Nastala razlika zavisi od stepena sličnosti oblika i dimenzija mašinskih delova i standardne epruvete, kao i od stepena osetljivosti materijala na koncentraciju napona. Mašinski delovi imaju vrlo složene oblike, Slika 4, kod kojih se preseći menjaju duž ose i to često dosta naglo: različiti žljebovi (uzdužni i poprečni), prelazi, zarezi, otvori, itd. Na mestima ovih prelaza, veličine napona i njihova raspodela po preseku bitno se razlikuju od napona u delovima bez ovakvih promena preseka (npr. standardne epruvete).



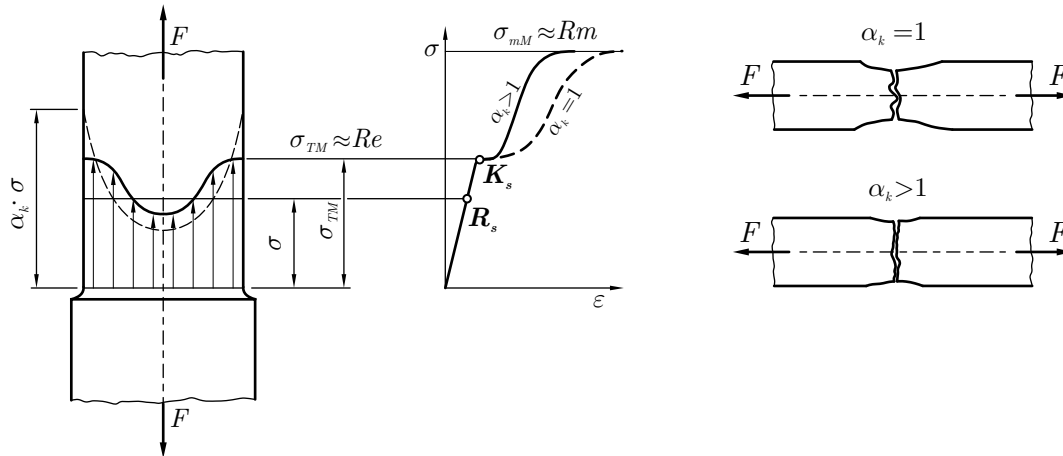
Slika 4 Različiti oblici diskontinuiteta poprečnog preseka mašinskih delova

Na Slici 5, prikazan je mašinski deo sa izvorom koncentracije napona, izrađen od elasto-plastičnog materijala (meki čelik; opšti konstrukcioni čelik) i izložen dejstvu statičkog zatežućeg opterećenja.

Sa porastom opterećenja raspodela napona u poprečnom preseku na mestu izvora koncentracije napona je neravnomerna (isprekidana linija). Raspodela napona prikazana isprekidanom linjom odgovara idealno elastičnom materijalu, kada u svim tačkama poprečnog preseka vladaju elastične deformacije. Kod realnih – elastoplastičnih materijala raspodela napona u porečnom preseku mašinskog dela ista je kao kod idealno elastičnih materijala, sve dok vrhovi napona

$$\sigma_{\max} = \sigma \cdot \alpha_k$$

ne dostignu vrednost napona tečenja, gde je α_k geometrijski (teorijski) faktor koncentracije napona koji zavisi od oblika i geometrije izvora koncentracije napona, vrste naprezanja i važi za teorijski (idealni materijal). Kada se dostigne ova vrednost napona, sa porastom opterećenja, vrhovi napona se ne povećavaju, već manje angažovane tačke poprečnog preseka uzimaju veće učešće u prenošenju



Slika 5 Raspodela napona u elastičnoj oblasti (isprekidana linija) i elastoplastičnoj oblasti (puna linija) – mek čelik

opterećenja. Usled toga, raspodela napona u poprečnom preseku mašinskog dela postaje ravnomernija (puna linija na Slici 5). Daljim povećanjem opterećenja, kada sve tačke poprečnog preseka dostignu granicu tečenja, tada raspodela napona u poprečnom preseku mašinskog dela sa koncentracijom napona približno odgovara raspodeli napona u poprečnom preseku glatke epruvete, ili mašinskog dela bez koncentracije napona. Shodno tome, napon tečenja mašinskog dela približno odgovara naponu tečenja glatke epruvete:

$$\sigma_{TM} \approx R_e$$

gde je:

σ_{TM} – napon tečenja mašinskog dela,

R_e – napon tečenja epruvete.

Daljim povećanjem opterećenja sve tačke poprečnog preseka pružaju približno isti unutrašnji otpor, odnosno napon. Kada nominalni napon dostigne vrednost približno jednak zateznoj čvrstoći, tada se sve tačke poprečnog preseka istovremeno razaraju u vidu kidanja, kao kod glatke epruvete kod koje je $\alpha_k = 1$. Shodno tome, zatezna čvrstoća mašinskog dela približno odgovara zateznoj čvrstoći epruvete:

$$\sigma_{mM} \approx R_m$$

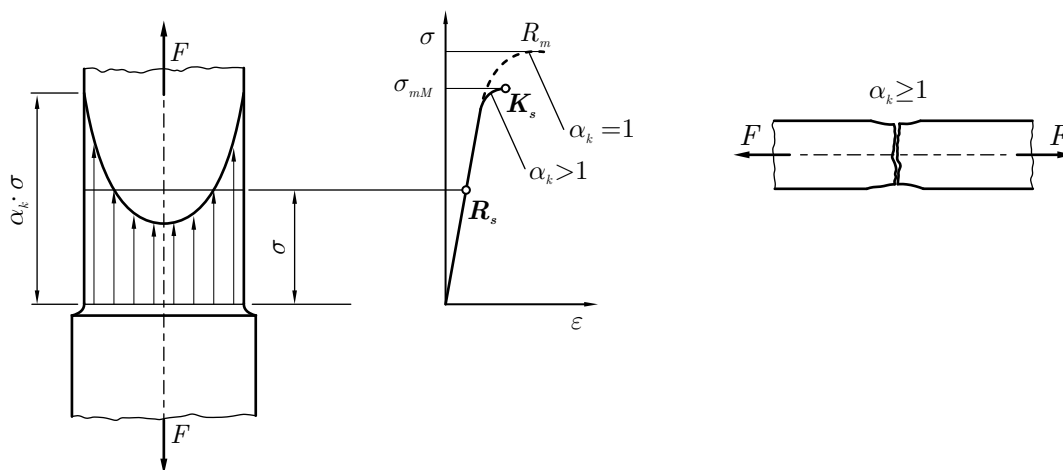
gde je:

σ_{mM} – zatezna čvrstoća mašinskog dela,

R_m – zatezna čvrstoća epruvete.

Prema tome, uticaj koncentracije napona na zateznu čvrstoću mašinskih delova izrađenih od elasto-plastičnih materijala pri statičkom opterećenju relativno je mali. Usled opisanog fenomena mašinski deo izložen višestrukoj koncentraciji napona (navojni deo zavrtnja) može čak imati zateznu čvrstoću veću od zatezne čvrstoće epruvete izrađene od istog materijala.

Mašinski delovi sa koncentracijom napona, izrađeni od materijala koji nema izraženu granicu tečenja (Slika 6) – visokokvalitetni čelici, pod dejstvom statičkog zatežućeg opterećenja imaju neravnomernu raspodelu napona po porečnom preseku (puna linija na Slici 6). Neravnomerna raspodela se zadržava sve dok najveći napon-vrh napona ne dostigne vrednost zatezne čvrstoće. Tada dolazi do kidanja mašinskog dela u tačkama poprečnog preseka u kojima vlada napon σ_{max} .



Slika 6 Dijagram zatezanja za epruvetu (isprekidana linija) i za mašinski deo (puna linija) – visokokvalitetan čelik

Eksperimentalna istraživanja su pokazala da mašinski delovi sa izvorom koncentracije napona, izrađeni od visokokvalitetnih-elastičnih materijala, i izloženi statičkom zatežućem opterećenju imaju manju zateznu čvrstoću u poređenju sa zateznom čvrstoćom standardne epruvete. Dijagram zatezanja mašinskog dela sa izvorom koncentracije napona (puna linija) i dijagram zatezanja epruvete (isprekidana linija) prikazani su na Slici 6. Zatezna čvrstoća mašinskog dela sa koncentracijom napona određena je odnosom najveće sile – sile kidanja F_m i veličine poprečnog preseka

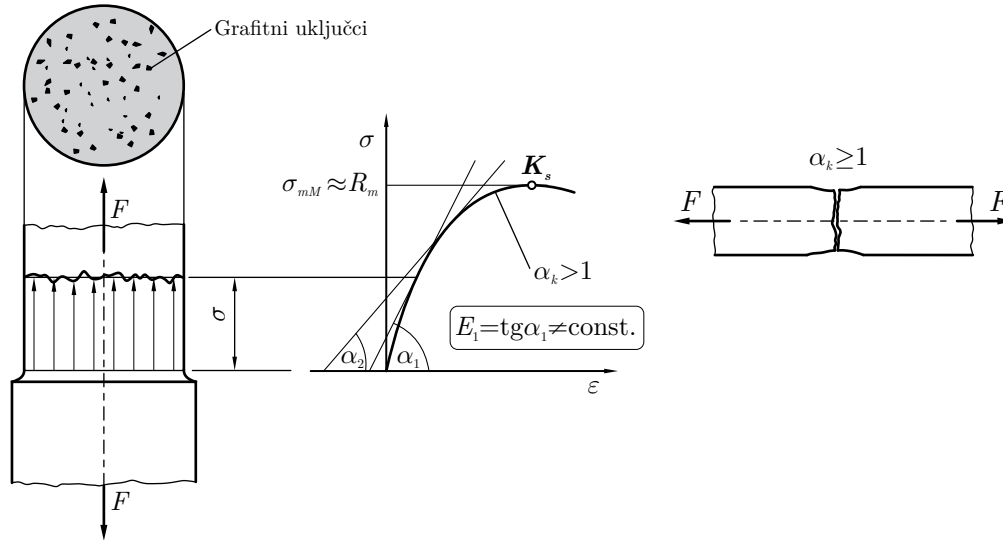
$$\sigma_{mM} = \frac{F_m}{A}$$

gde je A površina kritičnog poprečnog preseka. Ovako određena zatezna čvrstoća mašinskog dela manja je od zatezne čvrstoće epruvete i može se približno odrediti prema izrazu:

$$\sigma_{mM} \approx \frac{R_m}{\alpha_k}$$

Iz ovoga sledi da su izrazito kruti materijali (visokokvalitetni čelici) koji se ponašaju skoro kao idealan materijal, izuzetno nepovoljni za izradu mašinskih delova sa koncentracijom napona.

Nehomogeni materijali (liveno gvožđe; sivi liv) nemaju konstantnu vrednost modula elastičnosti, odnosno nemaju linearan deo krive na dijagramu zatezanja, Slika 7. Sličnost u ponašanju mašinskih delova i standardnih epruveta izrađenih od nehomogenog materijala, pri statičkom ispitivanju, posledica je neosetljivosti ovih materijala na promenu oblika poprečnog preseka usled postojanja unutrašnjih izvora koncentracije napona.



Slika 7 Raspodela napona i dijagram zatezanja za epruvetu i mašinski deo – nehomogeni materijal

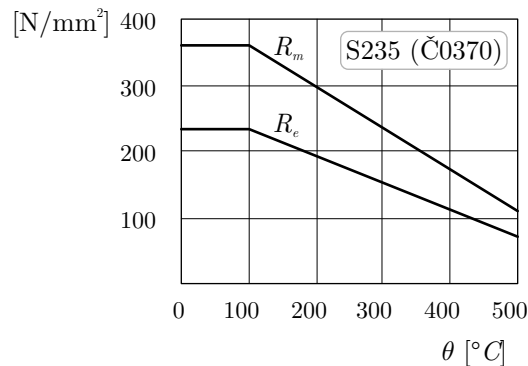
Iz ovih razloga mašinski delovi i standardna epruveta koji su izrađeni od nehomogenog materijala imaju približno iste vrednosti zatezne čvrstoće:

$$\sigma_{mM} \approx R_m.$$

Postojanje unutrašnjih izvora koncentracije napona smanjuje uticaj spoljašnjih, pa se ovi materijali ponašaju kao da su sasvim neosetljivi na koncentraciju napona. Iz ovog razloga ovi materijali se primenjuju kod mašinskih delova složenih oblika, sa velikim brojem koncentratora napona (npr. kućišta). Iako predstavljaju unutrašnje koncentratore napona, grafitni ukljucci imaju dobro svojstvo prigušavanja oscilacija zbog čega su nehomogeni materijali pogodni za izradu postolja mašina.

Na povišenim i na visokim temperaturama kritični naponi se smanjuju, Slika 8. Smanjuje se i modul elastičnosti. Brzina ovih smanjenja sa porastom temperature θ zavisi od hemijskog sastava i strukture čelika. U području visokih temperatura moguća je pojava **puzanja materijala (creep)**. To je pojava postepenog, kontinualnog plastičnog deformisanja pri stalnom, ili čak opadajućem opterećenju, u toku vremena, pri naponima koji inače odgovaraju oblasti elastičnosti. Deformisanje može posle izvesnog vremena prestati, ili nastaviti se do razaranja, u zavisnosti od opterećenja, temperature i osobina materijala.

Napon na granici puzanja (σ_{cr}) predstavlja napon pri kome brzina deformisanja u toku 25 do 35 časova ne prelazi vrednost od 0,001%/h, a trajne deformacije ne prelaze 0,2%. Ovo je važna karakteristika materijala za delove koji rade na povišenim temperaturama (parne i gasne turbine, kotlovska postrojenja, cevovodi, delovi motora sa unutrašnjim sagorevanjem i sl.).



Slika 8 Promena kritičnih napona sa porastom temperature opšteg konstrukcionog čelika S235