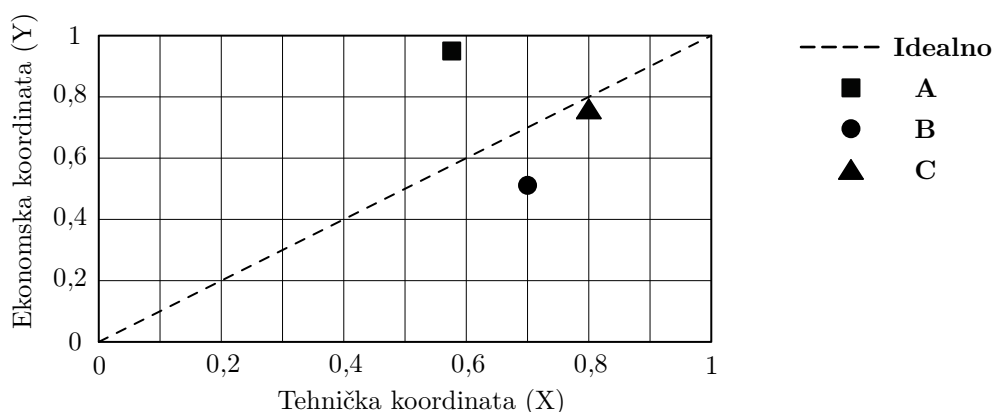


RAZRADA USVOJENOG KOMPROMISNOG REŠENJA

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-ekonomske 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):

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

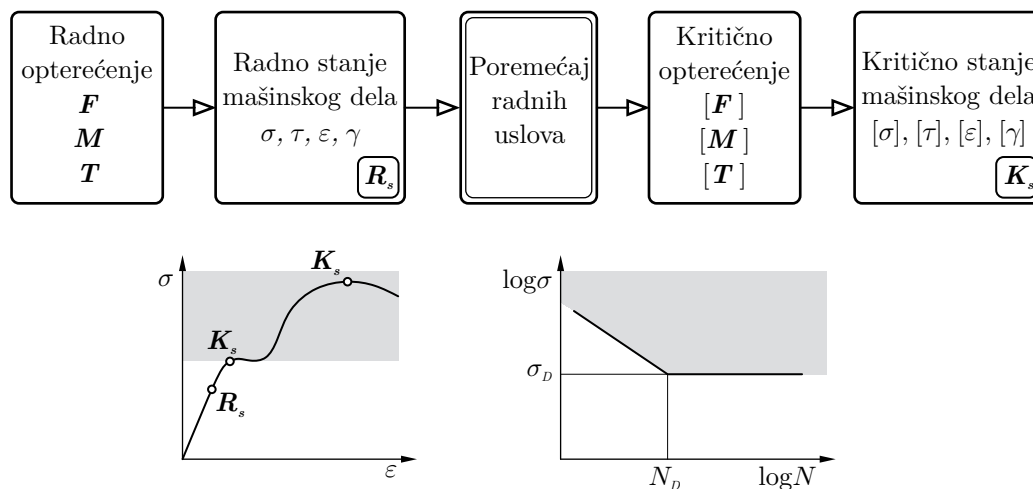
U gornjem izrazu figurišu sledeće veličine:

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

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

Potrebna vrednost odnosa kritičnog i radnog uslova (rezerva sigurnosti) određuje se za svaki mašinski deo posebno i zavisi od velikog broja uticajnih faktora:

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

gde su glavni uticaji koje treba uzeti u obzir:

- 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 korrespondentni radni uslov definisan je **stepen sigurnosti S** protiv neke neželjene, kritične pojave. Stepem 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:

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

gde su $[F]$, $[\varepsilon]$, $[\omega]$ i $[\theta]$ kritične vrednosti opterećenja, deformacija, ugaone brzine i temperature, respektivno, odnosno 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 karakterističnih mašinskih elemenata date su u Tabeli 1.

Tabela 1 Minimalne vrednosti stepena sigurnosti

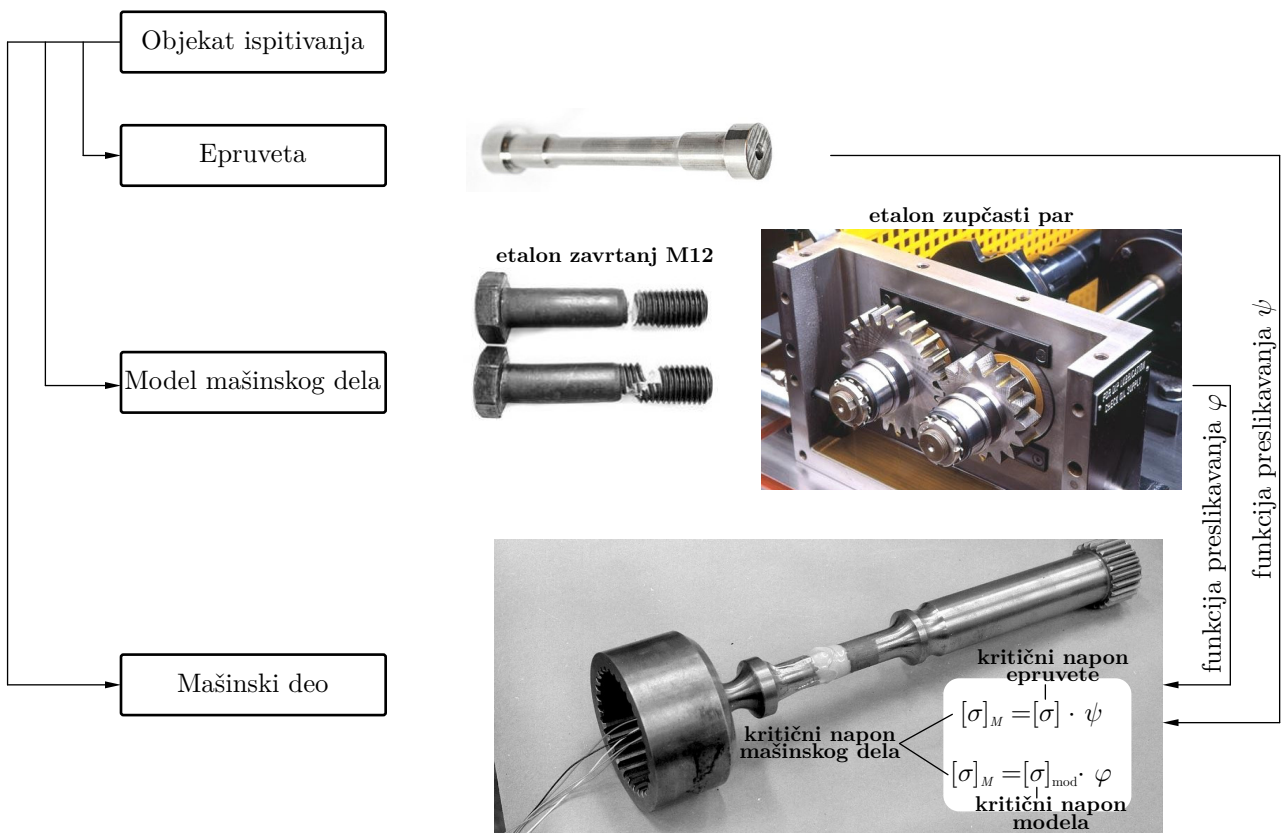
Mašinski deo	Zupčanik	Vratilo	Zavrtanj		Presovani spoj
			Podrešen	Nepodrešen	
S	1,25	1,50	1,50	1,25	1,10

Izbor materijala – Kritičnog napona

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

- elastične deformacije
- plastične deformacije
- statički lom
- dinamički lom
- habanje
- zagrevanje
- velike vibracije
- 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:

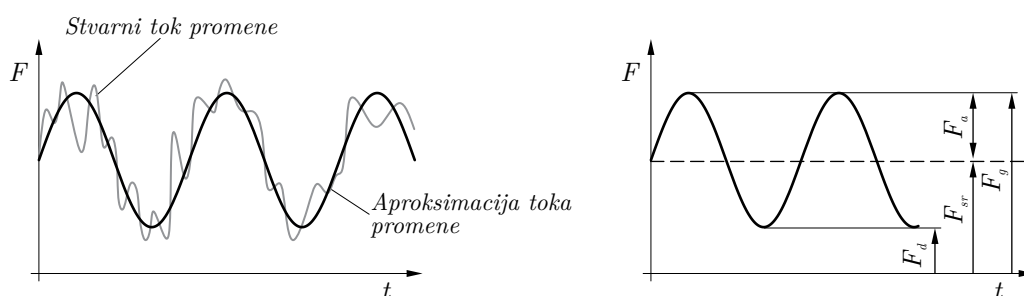
- primenom kratkotrajnih ubrzanih ispitivanja pri kojima su uslovi ispitivanja znatno stroži nego stvarni uslovi rada;
- ispitivanjem modela mašinskih delova primenom zakona potpune geometrijske sličnosti i Košijevog zakona, po kojem model i realan objekat imaju istu radnu sposobnost (isti stepen sigurnosti);
- korišćenjem podataka na osnovu ispitivanja etalon-mašinskih delova, kao što su zavrtnaj, 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;
- 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.

Pri tome, što su uslovi ispitivanja modela mašinskog dela (materijal, dimenzije, radno opterećenje) sličniji stvarnim uslovima rada samog mašinskog dela, to je potreba za rezervom sigurnosti manja.

Osnovne karakteristike radnog opterećenja

U pogledu karaktera promene radnog opterećenja tokom vremena, postoji **statičko** – mirno i **dinamičko** – promenljivo opterećenje. Opterećenje stalnog pravca, smera i intenziteta je statičko opterećenje. Dinamičko opterećenje se tokom vremena menja po intenzitetu, pravcu i smeru. Stvarni tok promene radnog opterećenja mašinskih delova (izvršioca elementarnih funkcija) u realnosti ima stohastičan tok promene, Slika 4. Ovakav tok promene je nepogodan za proračun, te se aproksimira kontinualnom funkcijom, najčešće sinusnog oblika. Osnovne karakteristike ovako aproksimiranog periodično promenljivog opterećenja su:

- minimalna (donja) F_d vrednost radnog opterećenja,
- maksimalna (gornja) F_g vrednost radnog opterećenja,
- amplituda radnog opterećenja F_a ,
- srednja vrednost radnog opterećenja F_{sr} .



Slika 4 Osnovne karakteristike periodično promenljivog opterećenja

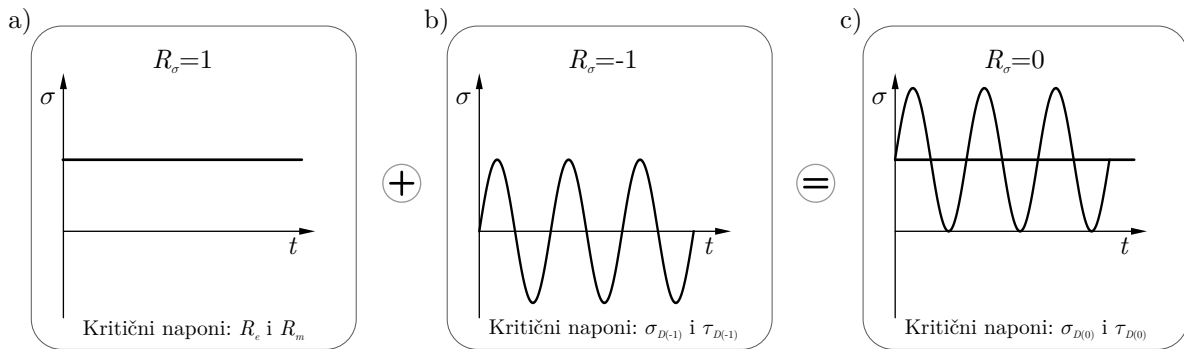
Za opisivanje karaktera promene opterećenja tokom vremena, uveden je **faktor asimetrije radnog opterećenja**:

$$R_F = \frac{F_d}{F_g}$$

Na identičan način može se definisati **faktor asimetrije napona**¹:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_g}$$

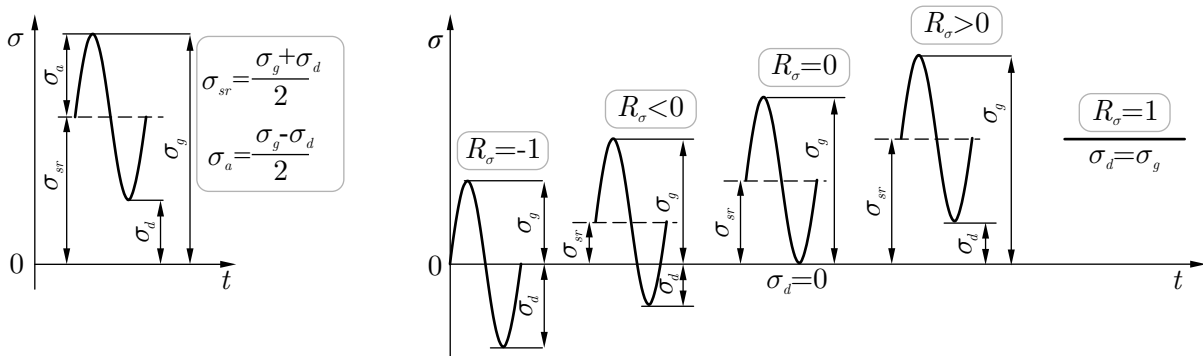
Kod statičkog opterećenja, Slika 5a, faktor asimetrije jednak je jedinici, a kod osnovnog dinamičkog opterećenja, Slika 5b – čisto naizmenično promenljivo opterećenje $\sigma_{sr} = 0$, faktor asimetrije $R = -1$. Zavisno od intenziteta statičkog opterećenja i intenziteta amplitude osnovnog dinamičkog opterećenja, mogu se formirati različiti oblici promenljivog – dinamičkog opterećenja.



Slika 5 a) statičko opterećenje, b) i c) periodično promenljivo opterećenje

Na Slici 5c prikazano je jednosmerno promenljivo opterećenje nastalo superpozicijom statičkog opterećenja i dinamičkog čija amplituda ima vrednost statičkog opterećenja. Kod ovog dinamičkog opterećenja faktor asimetrije jednak je nuli tj. $R = 0$.

Ostala promenljiva opterećenja nastaju superpozicijom osnovnog dinamičkog opterećenja i statičkog opterećenja, Slika 6.



Slika 6 Različiti slučajevi periodično promenljivog opterećenja

¹U određenim slučajevima faktor asimetrije radnog opterećenja i faktor asimetrije napona nisu u saglasnosti, tj. $R_F \neq R_\sigma$

Kritični naponi mašinskih delova u statičkim uslovima rada

Statički uslovi mašinskog dela određeni su sledećim uslovima:

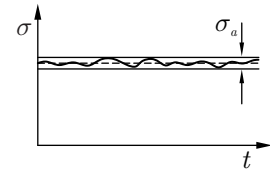
Prvi slučaj

Prvi slučaj statičkog opterećenja je prisutan kada se amplituda radnog napona u toku vremena ne menja, ili se menja u veoma uskom intervalu, te se može smatrati da je radni napon konstantnog intenziteta:

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

gde su:

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



Drugi slučaj

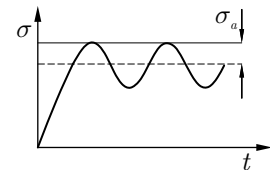
Drugi slučaj statičkog opterećenja je prisutan kada se amplituda radnog napona menja u toku vremena, ali je broj ciklusa promene radnog napona n manji od $10^3 \dots 10^4$. Pored ovoga, vrednost maksimalnog napona ne sme da premašuje vrednost napona tečenja mašinskog dela:

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

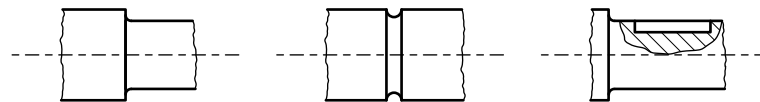
gde su:

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

σ_{TM} – napon tečenja mašinskog dela.

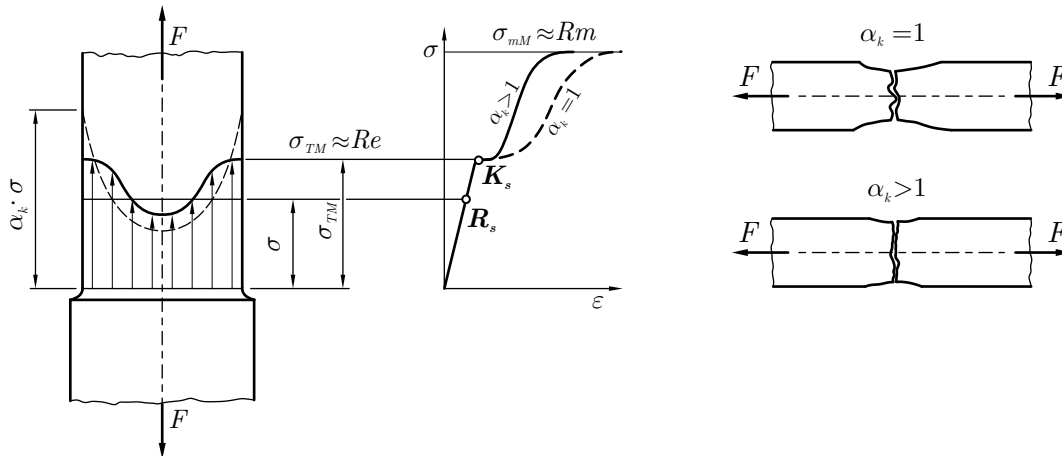


Statički kritični naponi mašinskih delova razlikuju se od statičkih kritičnih napona standardne epruvete. Nastala razlika zavisi od stepena sličnosti oblika i dimenzija mašinskih delova i standardne epruvete, kao i od stepena osetljivosti materijala na koncentraciju napona. Mašinski delovi imaju vrlo složene oblike, Slika 7, 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 7 Različiti oblici diskontinuiteta poprečnog preseka mašinskih delova

Na Slici 8, prikazan je mašinski deo sa izvorom koncentracije napona, izrađen od elasto-plastičnog materijala (meki čelik; opšti konstrukcioni čelik) i izložen dejstvu statičkog zatežućeg opterećenja.



Slika 8 Raspodela napona u elastičnoj oblasti (isprekidana linija) i elasto-plastičnoj oblasti (puna linija) – mek čelik

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

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

ne dostignu vrednost napona tečenja. Oznaka α_k odnosi se na 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 opterećenja. Usled toga, raspodela napona u poprečnom preseku mašinskog dela postaje ravnomernija (puna linija na Slici 8). 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 glatke, nezarezane 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:

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

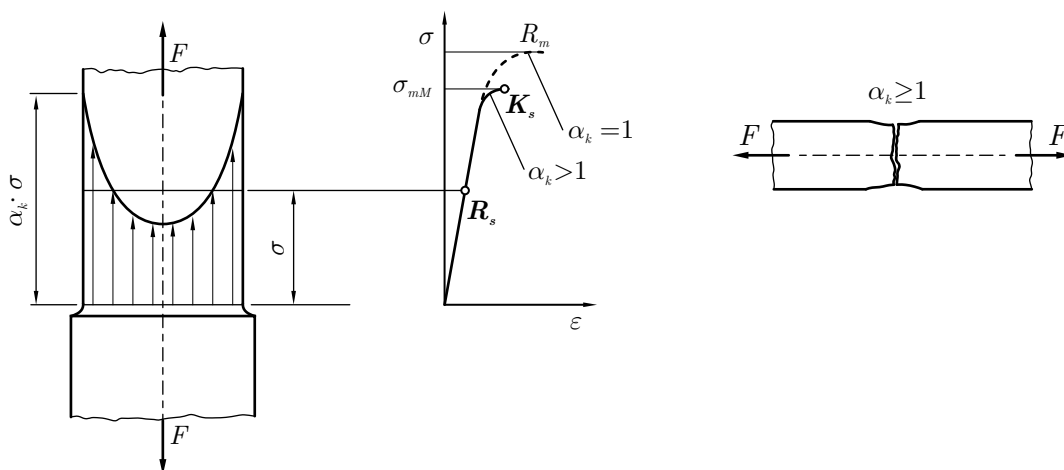
gde je:

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 9) – **visokokvalitetni čelici**, pod dejstvom statičkog zatežućeg opterećenja imaju neravnomernu raspodelu napona po poprečnom preseku (puna linija na Slici 9). 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 9 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 9. Zatezna čvrstoća mašinskog dela sa koncentracijom napona određena je odnosom najveće sile – sile kidanja F_m i veličine poprečnog preseka

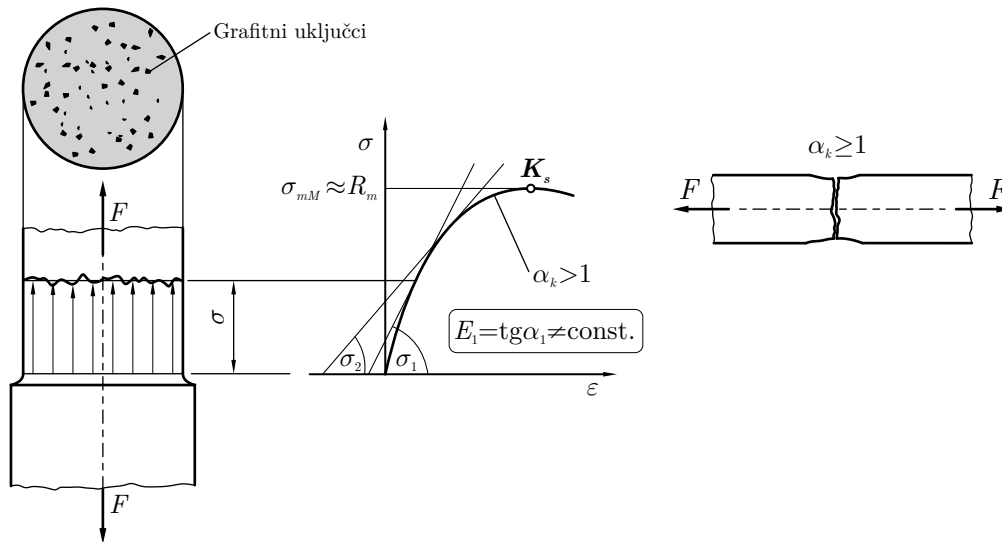
$$\sigma_{mM} = \frac{F_m}{A}$$

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 10. 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 sopstvenih, unutrašnjih izvora koncentracije napona.



Slika 10 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 uključci imaju dobro svojstvo prigušavanja oscilacija zbog čega su nehomogeni materijali pogodni za izradu postolja mašina.

Geometrijski (teorijski) faktor koncentracije napona

Odnosom maksimalnog napona na mestu izvora koncentracije napona (σ_{\max}), prema nominalnom naponu (σ_{nom} ²) koji bi vladao u posmatranom poprečnom preseku bez izvora koncentracije napona, definisan je teorijski (geometrijski) faktor koncentracije napona:

$$\alpha_{k\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nom}} \qquad \alpha_{k\tau} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{nom}}.$$

Faktor koncentracije napona, odnosi se na idealan (zamišljen) teorijski materijal, saglasno tome sledi naziv *teorijski faktor koncentracije napona*. Pored ovoga, faktor koncentracije napona, primarno zavisi od geometrije izvora koncentracije napona. Saglasno tome, sledi naziv *geometrijski faktor koncentracije napona*. Nominalni naponi (σ_{nom}) određuju se, zavisno od vrste naprezanja, prema izrazima iz Otpornosti materijala. Maksimalne vrednosti napona (σ_{\max}) u zoni koncentracije napona, mogu se odrediti eksperimentalno, pomoću mernih traka ili metode foto elastičnosti, ili teorijski, primenom

²Često se u oznakama nominalnih napona eliminiše skraćenica *nom*, odnosno $\sigma_{nom} = \sigma$, $\tau_{nom} = \tau$

metode konačnih elemenata.

U poprečnom preseku mašinskog dela na mestu izvora koncentracije napona, raspodele nominalnih i stvarnih napona nisu iste, ali je ukupni intenzitet unutrašnjih sila-napona isti. To znači, da je površina ispod raspodele nominalnog napona jednaka površini ispod raspodele stvarnog napona. Ovu činjenicu treba imati u vidu pri grafičkom prikazivanju raspodele nominalnih i stvarnih napona (Slike 8, 9 i 10).

Vrednosti geometrijskog faktora koncentracije napona se odnose na idealan materijal. One zavise od oblika izvora koncentracije napona i vrste naprezanja, a daju se u obliku dijagrama i tabela. Dijagramima na Slici 11 date su vrednosti geometrijskog faktora koncentracije napona za različite oblike izvora koncentracije napona i vrste naprezanja.

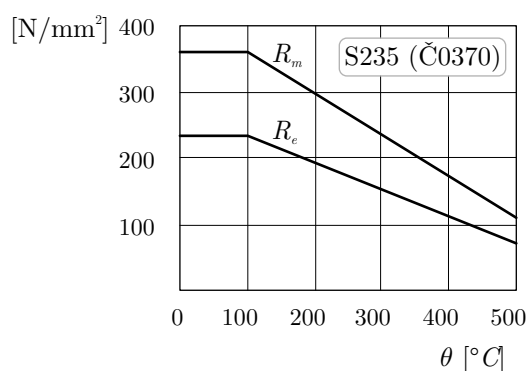
Kada konstrukcioni oblici mašinskih delova zahtevaju promenu poprečnog preseka, tada u cilju smanjenja maksimalnog napona na mestu izvora koncentracije, treba imati u vidu sledeće preporuke:

- izvore koncentracije napona postavljati na mestima minimalnih nominalnih napona. Na osnovu napadnih opterećenja odnosno statičkih dijagrama vrši se analiza naponskog stanja u poprečnim presecima mašinskih delova,
- izvore koncentracije napona izvoditi u što blažoj formi, primenom blagih prelaznih zaobljenja,
- u okolini glavnog izvora koncentracije napona postavljati blaže izvore koncentracije napona, tzv. zareze rasterećenja.

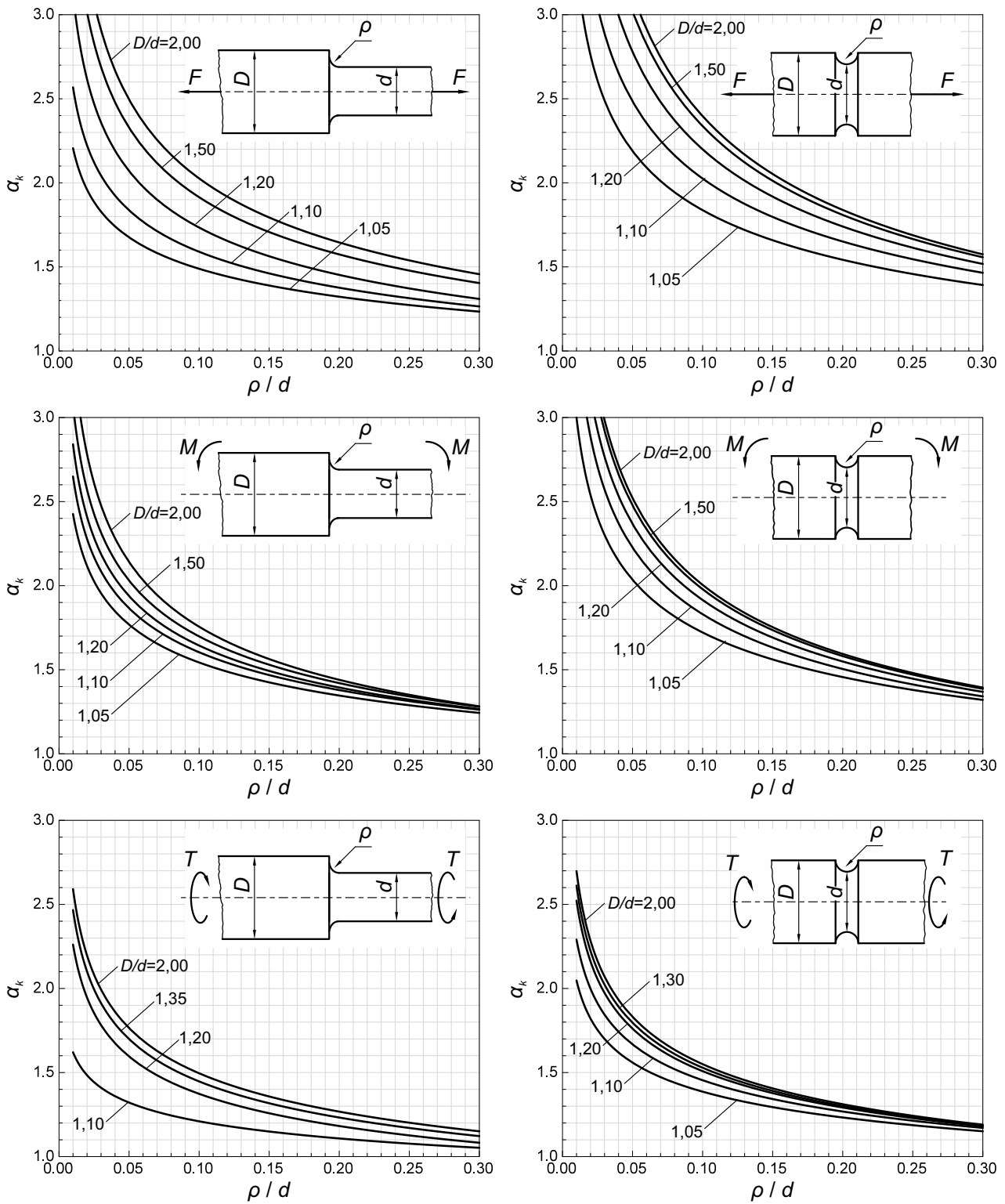
Uticaj temperature na kritični napon mašinskih delova

Na povišenim i na visokim temperaturama kritični naponi se smanjuju, Slika 12. 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.

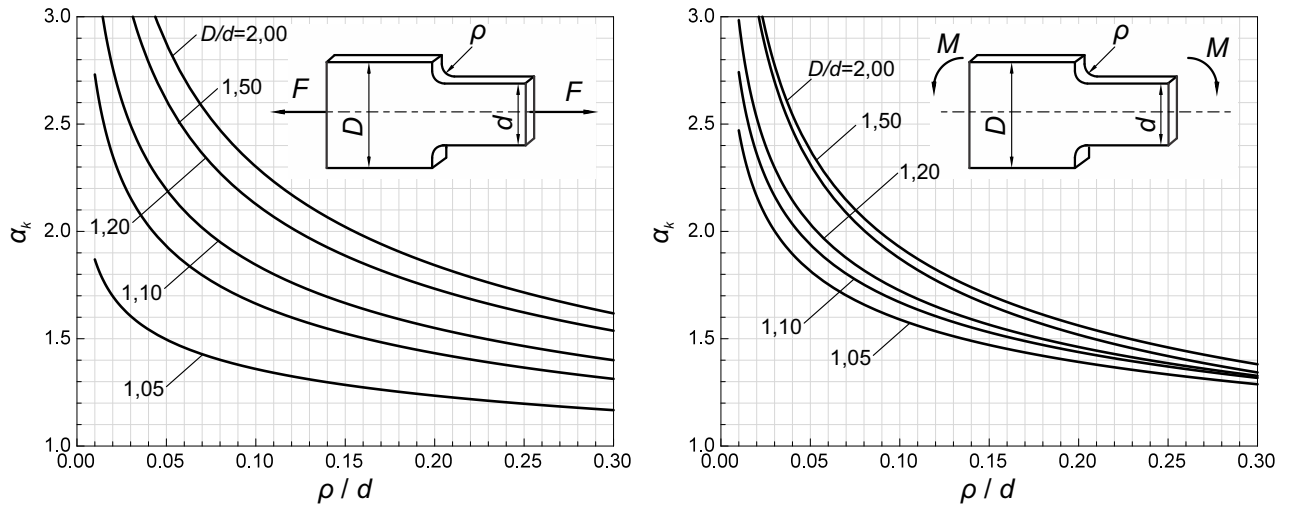
Napon na granici puzanja (σ_{cr}) predstavlja napon pri kome brzina deformisanja u toku 25 do 35 časova ne prelazi vrednost od 0,001% /h, a trajne deformacije ne prelaze 0,2%. Ovo je važna karakteristika materijala za delove koji rade na povišenim temperaturama (parne i gasne turbine, kotlovska postrojenja,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



Slika 12 Promena kritičnih napona sa porastom temperature opšteg konstrukcionog čelika S235



Slika 11 Geometrijski faktor koncentracije napona



Slika 11 Geometrijski faktor koncentracije napona – nastavak