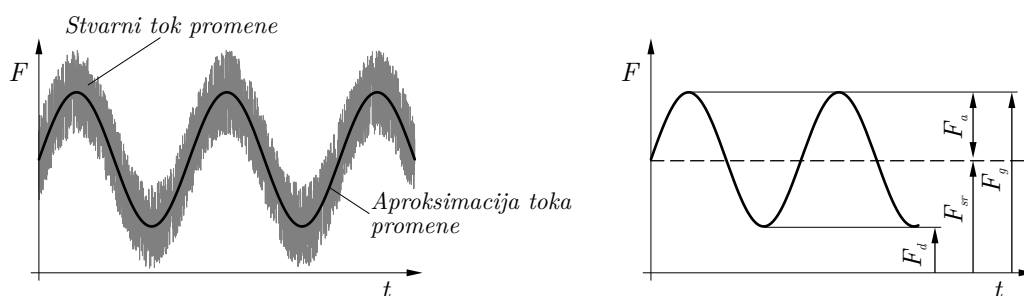


KRITIČNI NAPONI IZVRŠIOCA ELEMENTARNIH FUNKCIJA U USLOVIMA PROMENLJIVOG OPTEREĆENJA

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 (izvršioца elementarnih funkcija) u realnosti ima stohastičan tok promene, Slika 1. Ovakav tok promene je nepogodan za proračun, te se aproksimira kontinualnom funkcijom, najčešće sinusnog oblika. Osnovne karakteristike ovako aproksimiranog dinamičkog opterećenja su: minimalna (donja) F_d i maksimalna (gornja) F_g vrednost, zatim amplituda opterećenja F_a i srednja vrednost opterećenja F_{sr} , Slika 1.



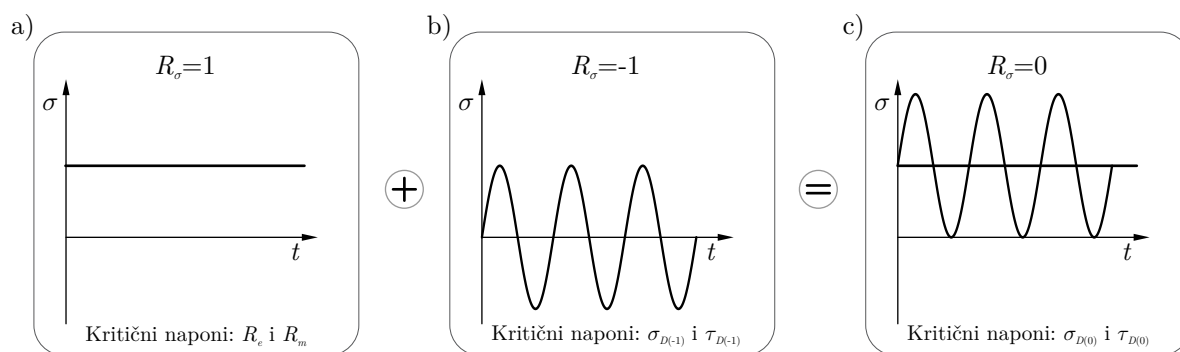
Slika 1 Osnovne karakteristike periodično promenljivog opterećenja

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

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

Na identičan način definiše se i **faktor asimetrije napona**¹:

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



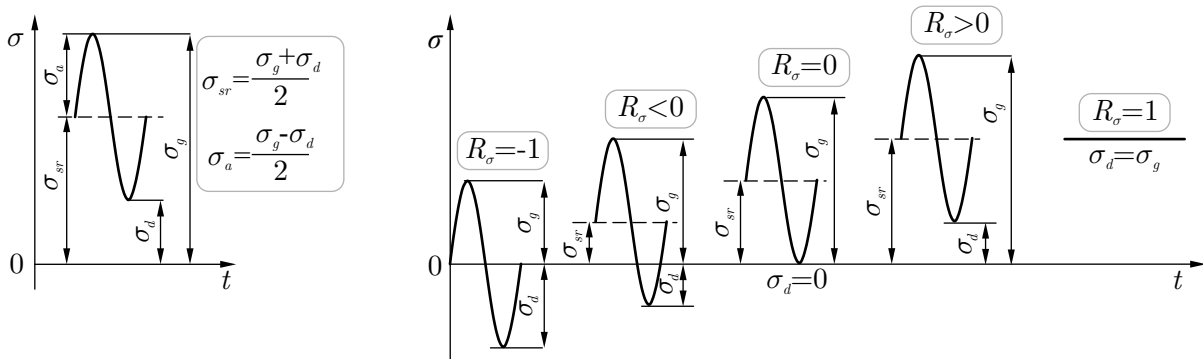
Slika 2 a) statičko opterećenje, b) i c) periodično promenljivo opterećenje

Kod statičkog opterećenja, Slika 2a, faktor asimetrije jednak je jedinici, a kod osnovnog dinamičkog opterećenja, Slika 2b – 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. Na Slici 2c prikazano je

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

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 3.

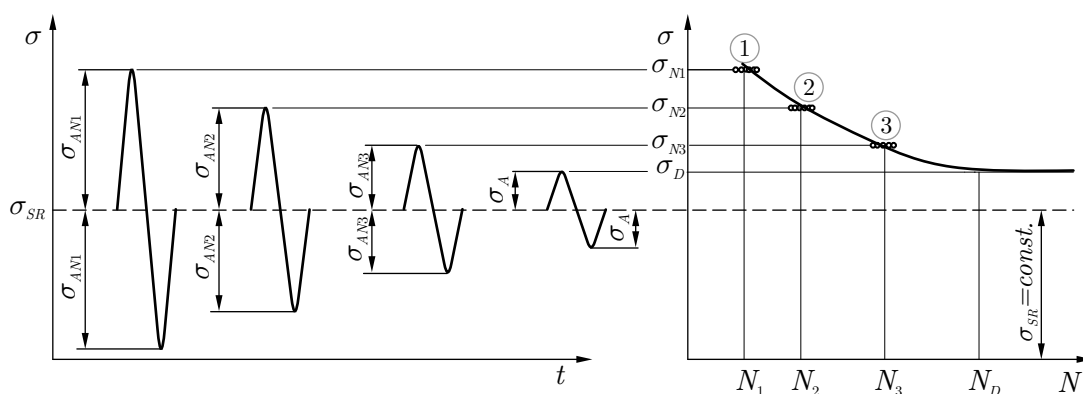


Slika 3 Različiti slučajevi periodično promenljivog opterećenja

Dinamičke karakteristike u oblasti trajne čvrstoće

Dinamičke karakteristike materijala ne zavise samo od veličine napona i načina njegove promene već i od broja promene napona – ciklusa. Imajući ovo u vidu, neophodno je uspostaviti vezu između napona i broja ciklusa. Ova zavisnost utvrđuje se eksperimentalnim putem – dinamičkim ispitivanjima koja su dugotrajna i skupa. Ispitivane epruvete konstantnog poprečnog preseka (prečnika 7-10 mm), obrađene brušenjem, izlažu se promenljivoj opterećenju.

Za jedan nivo napona σ_{N1} ispituje se više epruveta (obično 10 komada) i registruje se broj ciklusa N_1 pri kojem dolazi do loma. Dobijeni rezultati unose se u koordinatni sistem $\sigma - N$, Slika 4.



Slika 4 Formiranje Velerove krive

Kod drugog nivoa napona σ_{N2} zadržava se isti srednji napon a amplituda napona se smanjuje i ponovo se registruje broj promena napona N_2 do loma. Ovaj postupak se nastavlja sve do napona σ_D , a to je najveći nominalni napon koji epruveta ispitivanog materijala može izdržati bez razaranja – dinamičkog loma pri neograničenom broju ciklusa, Slika 4.

Ovaj napon se naziva **trajna dinamička čvrstoća** ili **dinamička izdržljivost** i jednak je zbiru srednjeg napona σ_{SR} i amplitude dinamičke čvrstoće σ_A :

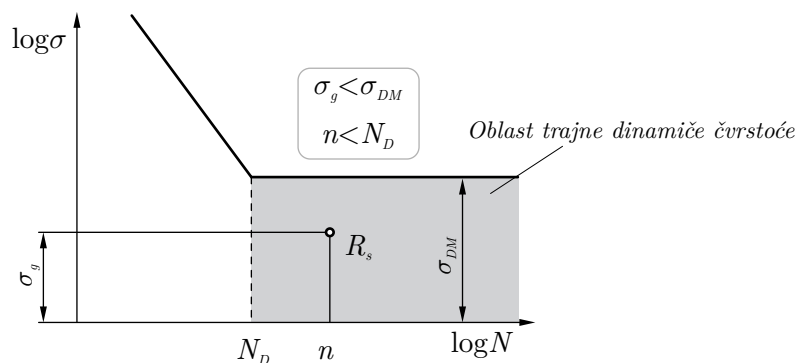
$$\sigma_D = \sigma_{SR} + \sigma_A, \quad \tau_D = \tau_{SR} + \tau_A.$$

Broj ciklusa N_D naziva se granični broj ciklusa i za konstrukcione čelike iznosi $10 \cdot 10^6$. Spajanjem dobijenih tačaka u koordinatnom sistemu $\sigma - N$ dobija se kriva zamaranja – Velerova kriva, prikazana na Slici 4. Velerova kriva može se analitički prikazati u obliku:

$$\sigma_N^m \cdot N = const.,$$

gde je sa m označen eskponent Velerove krive.

Za crtanje Velerove krive u koordinatnom sistemu $\sigma - N$, potrebno je poznavati veliki broj tačaka koje se dobijaju ispitivanjem. Ista zavisnost u logaritamskom koordinatnom sistemu $\log\sigma - \log N$ ima oblik prave linije, dijagram na Slici 5. Na ovaj način broj ispitivanja za prikazivanje Velerove krive je znatno smanjen.

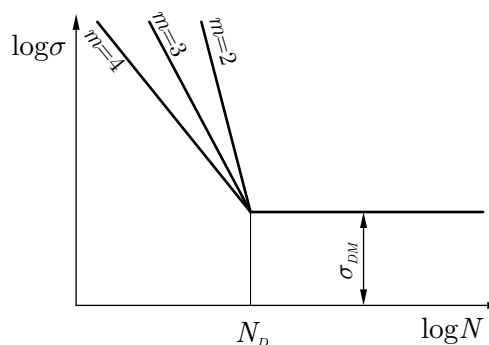


Slika 5 Predstavljanje Velerove krive u logaritamskom koordinatnom sistemu

Na osnovu rezultata ispitivanja, koordinata dve tačke na Velerovoj krivoj i analitičkog izraza za Velerovu krivu može se odrediti eksponent Velerove krive:

$$m = \frac{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{\log\left(\frac{\sigma_{N1}}{\sigma_{N2}}\right)}.$$

Uticaj eksponenta Velerove krive na nagib pravolinijskog dela dijagrama, prikazan je na Slici 6.



Slika 6 Uticaj eksponenta m na oblik Velerove krive

U zavisnosti od načina promene promenljivog opterećenja Slika 2b i 2c, koje deluju na epruvetu tokom ispitivanja, mogu se dobiti sledeće dinamičke čvrstoće:

- $\sigma_{D(0)}$ i $\tau_{D(0)}^2$ – trajna dinamička čvrstoća pri jednosmernom promenljivom opterećenju (faktor asimetrije napona $R_\sigma, \tau = 0$),
- $\sigma_{D(-1)}$ i $\tau_{D(-1)}^2$ – trajna dinamička čvrstoća pri naizmenično promenljivom opterećenju (faktor asimetrije napona $R_\sigma, \tau = -1$).

²Brojna vrednost unutar zagrada u oznaci dinamičke čvrstoće odnosi se na faktor asimetrije napona R_σ ili R_τ

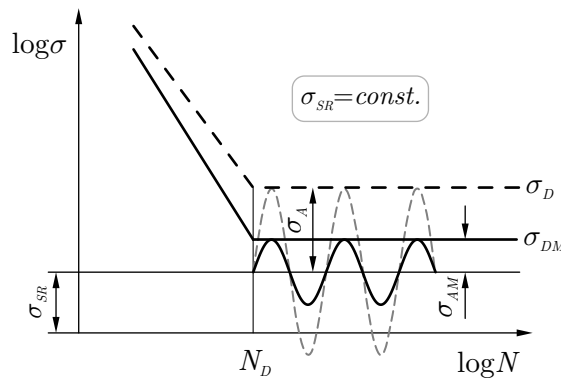
Velerova kriva prikazana na Slici 4 odnosi se na jedan određeni srednji napon ($\sigma_{SR} = const.$). Za neki drugi srednji napon Velerova kriva će imati sličan tok, ali različite numeričke vrednosti trajne dinamičke čvrstoće. Prema tome, svakom srednjem naponu odgovara određena dinamička čvrstoća i Velerova kriva. Za inženjersku praksu veliki broj Velerovih dijagrama (svakom srednjem naponu odgovara jedna kriva) nije praktičan, pa se iz tih razloga daje sledeća funkcionalna zavisnost:

$$\sigma_D = f(\sigma_{SR}),$$

u vidu Smitovog dijagrama Slika 8a, 8b i 8c. Za crtanje Smitovog dijagrama potrebne su tri karakteristike materijala, dve dinamičke:

- dve dinamičke: $\sigma_{D(0)}$ i $\sigma_{D(-1)}$,
- jedne statičke, napon na granici tečenja: R_e .

Postupak ispitivanja dinamičkih karakteristika mašinskih delova je isti kao kod ispitivanja standardnih epruveta. Rezultati ispitivanja prikazuju se Velerovom krivom i Smitovim dijagramom. Na Slici 7 prikazana je Velerova kriva za mašinski deo (puna linija) i za epruvetu (isprekidana linija).



Slika 6 Velerova kriva za epruvetu i mašinski deo

Dinamička čvrstoća mašinskog dela manja je od dinamičke čvrstoće epruvete. Količnikom amplitude dinamičke čvrstoće epruvete σ_A i mašinskog dela σ_{AM} definisan je **faktor dinamičke čvrstoće**:

$$K_D = \frac{\sigma_A}{\sigma_{AM}},$$

koji se približno može odrediti na osnovu izraza:

$$K_D \approx \frac{\beta_k}{\xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3} = \frac{(\alpha_k - 1)\eta_k + 1}{\xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3},$$

gde su:

- α_k – geometrijski (teorijski) faktor koncentracije napona,
- η_k – faktor osetljivosti materijala na koncentraciju napona,
- β_k – efektivni faktor koncentracije napona,
- ξ_1 – faktor veličine poprečnog preseka,
- ξ_2 – faktor stanja površine,
- ξ_3 – faktor koji uzima u obzir ostale uticaje (termička obrada, radna sredina...).

Svi ovi faktori određuju se eksperimentalnim putem. Za najčešće korišćene mašinske delove (vratila, zavrtnjevi, ...) oni su detaljno ispitani i dati u vidu tabličnih vrednosti.

Eksperimentalna istraživanja pokazala su da svi materijali nisu podjednako osetljivi na koncentraciju napona. Najkvalitetniji materijali su najosetljiviji ($\eta_k \rightarrow 1$), elastoplastični materijali su manje osetljivi ($\eta_k \approx 0,6$), a nehomogeni materijali su najmanje osetljivi na koncentraciju napona ($\eta_k \approx 0,45$).

Za praktičnu primenu crta se Smitov dijagram za mašinski deo na osnovu tri eksperimentalno određene karakteristike:

- o dve dinamičke: $\sigma_{D(0)M}$ i $\sigma_{D(-1)M}$,
- o jedne statičke, napon na granici tečenja: σ_{TM} .

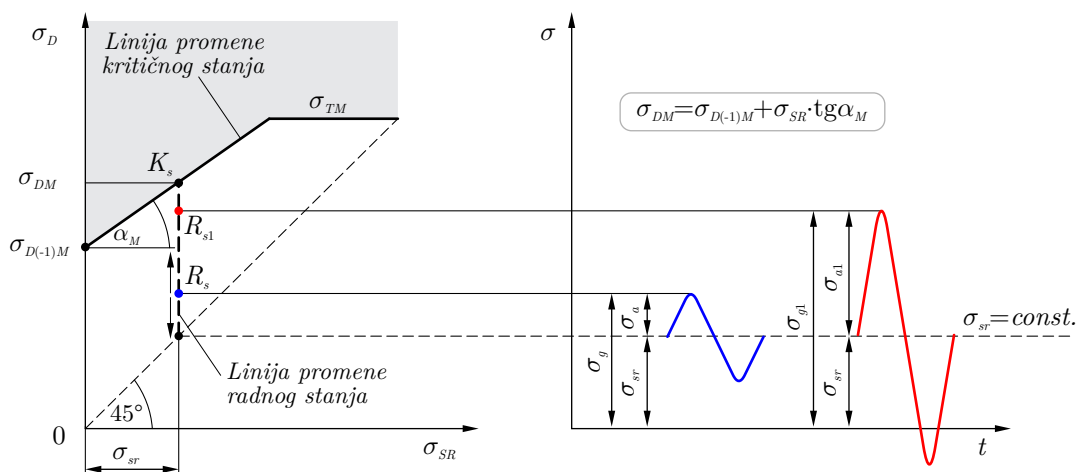
Na osnovu Smitovog dijagrama može se odrediti dinamička čvrstoća mašinskog dela za svaki srednji napon.

U nepredviđenim radnim uslovima mašinskog dela neke veličine periodično promenljivog napona, ili njihovi odnosi, zadržavaju svoje prvobitne vrednosti koje odgovaraju predviđenim radnim uslovima. Shodno tome mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja periodično promenljivog radnog napona:

- o srednji napon ima stalnu vrednost: $\sigma_{sr} = const.$,
- o odnos srednjeg napona i amplitude napona ima stalnu vrednost: $\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_a} = const.$,
- o donji napon ima stalnu vrednost: $\sigma_d = const.$.

Detaljna teorijska analiza tri navedena slučaja može se naći u knjizi *Mašinski elementi 1 – R. Mitrović, M. Ristivojević, B. Rosić*. U nastavku teksta biće dati samo konačni izrazi za određivanje kritičnog napona mašinskog dela.

Prvi slučaj: srednji napon ima stalnu vrednost.

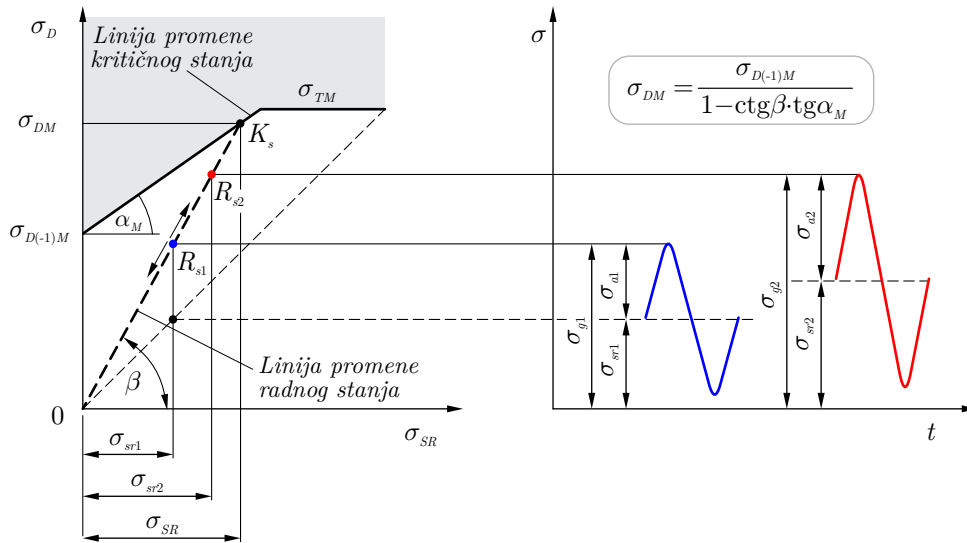


Slika 8a

Izraz za određivanje ugla nagiba linearnog dela Smitovog dijagrama mašinskog dela:

$$\text{tg} \alpha_M = 1 + \left(1 - \frac{2\sigma_{D(-1)}}{\sigma_{D(0)}} \right) \frac{1}{K_D}$$

Drugi slučaj: odnos srednjeg napona i amplitude napona ima stalnu vrednost.



Slika 8b

Ugao nagiba linije promene radnog stanja:

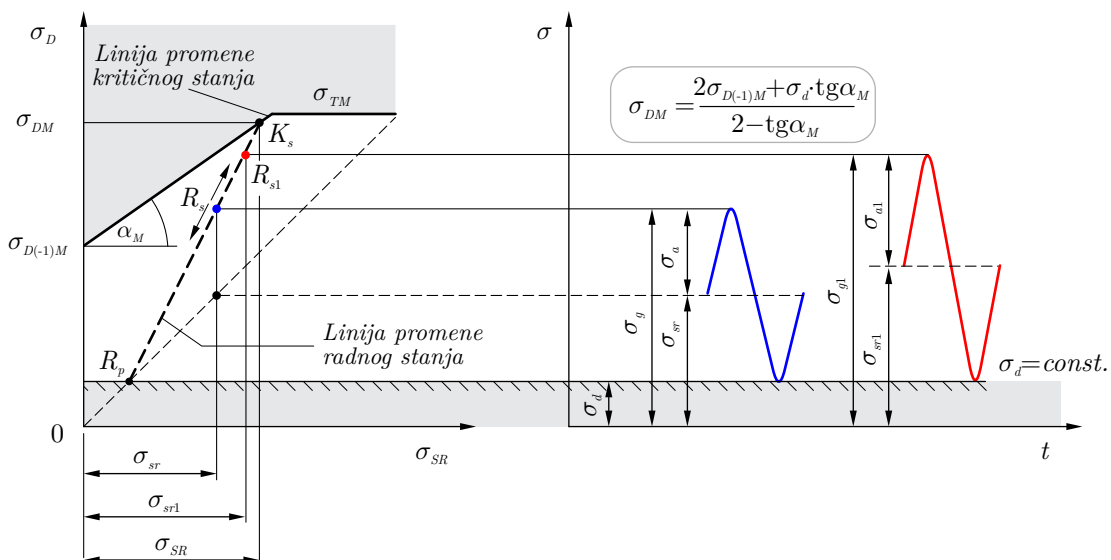
$$\operatorname{ctg}\beta = \frac{R_{\sigma} + 1}{2}.$$

U specijalnom slučaju, kada je $\sigma_d = 0$, izraz za trajnu dinamičku čvrstoću mašinskog dela postaje:

$$\sigma_{DM} = \frac{\sigma_{D(-)M}}{1 - 0,5 \operatorname{tg}\alpha_M}$$

jer je $R_{\sigma} = \frac{\sigma_d}{\sigma_g} = 0$, pa je $\operatorname{ctg}\beta = 0,5$.

Treći slučaj: donji napon ima stalnu vrednost.



Slika 8c

Na Smitovom dijagramu stanje predopterećenja mašinskog dela kada je $\sigma_d = const.$ nalazi se u tački preseka donjeg napona σ_d i srednje linije Smitovog dijagrama (isprekidana linija pod uglom od 45°), tačka R_p . Pod dejstvom radnog opterećenja mašinski deo se iz stanja predopterećenja dovodi u radno stanje (tačka R_s) na Smitovom dijagramu.

Izraz za trajnu dinamičku čvrstoću može se napisati i u sledećem obliku:

$$\sigma_{DM} = \frac{2\sigma_{D(-1)M} + \sigma_d \cdot \operatorname{tg}\alpha_M}{2 - \operatorname{tg}\alpha_M} = \frac{\sigma_{D(-1)M} + \left(\frac{\sigma_d}{2}\right) \cdot \operatorname{tg}\alpha_M}{1 - 0,5\operatorname{tg}\alpha_M}.$$