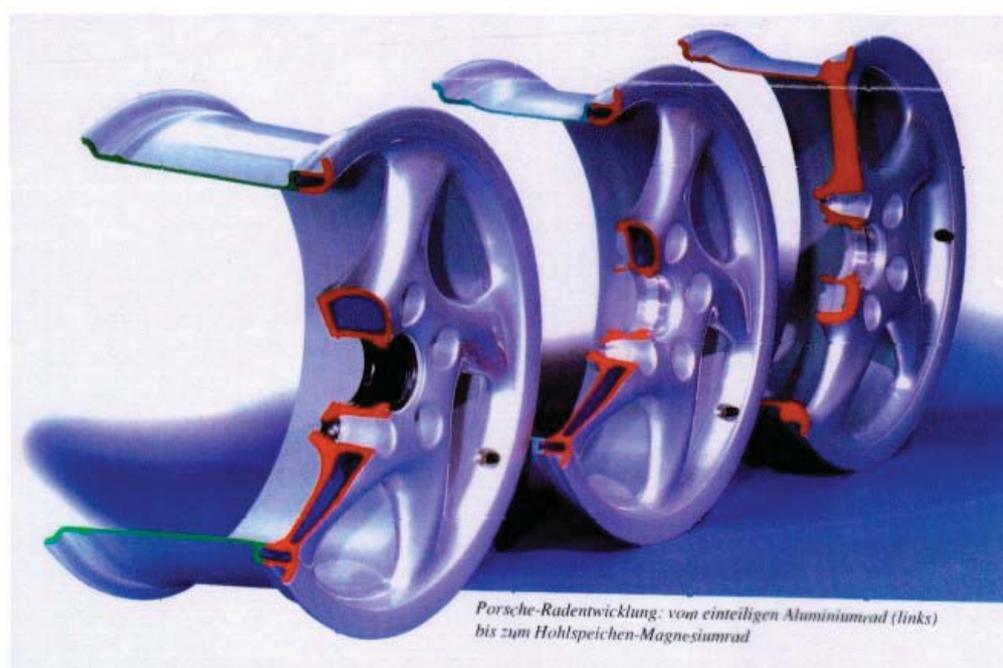


# POGONSKA ČVRSTOĆA

V. Grubišić



Split, 2004.



## SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Uvod - zahtjevi za optimalno dimenzioniranje.</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Metode određivanja pogonske čvrstoće - stanje znanosti i tehnike  | 1         |
| Slika 1.1 Metode dimenzioniranja  | 1         |
| Slika 1.2 Odnos između pogonskog opterećenja i vijeka trajanja  | 1         |
| Slika 1.3 Podjela čvrstoće pri promjenljivim opterećenjima  | 2         |
| Slika 1.4 Utjecajne veličine na pogonsku čvrstoću   | 2         |
| Slika 1.5 Vrsta opterećenja i vijek trajanja  | 3         |
| Slika 1.6 Upliv spektra opterećenja na zamornu čvrstoću   | 3         |
| Slika 1.7 Kriterij loma i vijek trajanja  | 4         |
| Slika 1.8 Parametri za sigurnost na lom vitalnih komponenti   | 4         |
| <b>2. Pogonska opterećenja.</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Vrste pogonskih opterećenja   | 5         |
| Slika 2.1 Primjeri izmjerenih tokova funkcija naprezanje-vrijeme  | 5         |
| Slika 2.2 Izvori i podjela pogonskog opterećenja  | 5         |
| 2.2 Sistematika pogonskih opterećenja – prikaz pogonskih opterećenja  | 6         |
| Slika 2.3 Osnovne statističke metode brojanja opterećenja   | 6         |
| Slika 2.4 Osnovne metode analize poonskog opterećenja - gubitak srednje vrijednosti   | 6         |
| Slika 2.5 Osnovne metode brojanja – prikaz kao spektar  | 7         |
| Slika 2.6 Dodatne metode brojanja   | 7         |
| Slika 2.7 Srednja vrijednost toka opterećenja i spektar   | 8         |
| Slika 2.8 Vrste spektara pogonskih opterećenja  | 8         |
| Slika 2.9 "RAIN FLOW" (kišni tok) - metoda brojanja i histereza naprezanje-deformacija  | 9         |
| Slika 2.10 a) Brojanje toka deformacija jednog ciklusa opterećenja "EUROPSKI CIKLUS" glavčine kotača; b) Brojanje toka deformacija jednog ciklusa opterećenja rukavca osovine – tlačna strana | 9         |
| Slika 2.11 Metoda praćenja redosljeda opterećenja   | 10        |
| Slika 2.12 Korelacija dviju vrijednosti i njihovih učestalosti  | 10        |
| Slika 2.13 Analogna shema za proračun spektralne gustoće efektivne vrijednosti  | 11        |
| Slika 2.14 Spektralna gustoća efektivne vrijednosti zavješnja vozila  | 11        |
| Slika 2.15 Priprema osovine teretnog vozila za merenje sila   | 12        |
| Slika 2.16 Vremenska promjena naprezanja na pojedinim komponentama zavješnja  | 12        |
| Slika 2.17 Osnovni podaci za određivanje spektra pogonskog opterećenja  | 13        |
| Slika 2.18 Primjer pogonskih opterećenja na prednjoj osovini nosivosti 7 tona (MAN)   | 13        |
| Slika 2.19 Poredba konstrukcijskog spektra naprezanja i mjerenja tvornice MAN   | 14        |
| <b>3. Ponašanje materijala pri pogonskim opterećenjima.</b>   | <b>15</b> |
| 3.1 Podaci potrebni za procjenu pogonske čvrstoće   | 15        |
| Slika 3.1 Tipovi probnih epruveta   | 15        |
| Slika 3.2 Odnos naprezanja i deformacija pri cikličkom opterećenju  | 15        |
| Slika 3.3 Cikličko očvršćenje i omekšanje   | 15        |
| Slika 3.4 Vijek trajanja pri kontroliranim deformacijama  | 16        |
| Slika 3.5 Vrsta opterećenja i vijek trajanja  | 16        |
| Slika 3.6 Upliv intenziteta opterećenja na vijek trajanja   | 17        |
| Slika 3.7 Faktor neregularnosti procesa   | 17        |
| Slika 3.8 Rasipanje čvrstoće  | 18        |
| Slika 3.9 Statistička obrada rezultata mjerenja – vremenska čvrstoća  | 18        |
| Slika 3.10 Statistička obrada rezultata mjerenja – trajna dinamička čvrstoća  | 19        |
| 3.2 Utjecaji na pogonsku čvrstoću materijala  | 20        |
| Slika 3.11 Čvrstoće različitih materijala (vlak - tlak)   | 20        |
| Slika 3.12 Čvrstoće različitih materijala (savijanje)   | 20        |
| Slika 3.13 Poredba čvrstoća pri pravilno promjenljivim opterećenjima  | 21        |
| Slika 3.14 Mehanika loma  | 21        |
| Slika 3.15 Deformacije kod radnog opterećenja   | 22        |

|  |           |
|--|-----------|
| Slika 3.16 Promjena krutosti uslijed radnog opterećenja. ....  | 22        |
| Slika 3.17 Zamorna čvrstoća kompozita u odnosu na statičku čvrstoću. ....  | 22        |
| Slika 3.18 Krivulja vijeka trajanja za različite promjene krutosti. ....   | 23        |
| Slika 3.19 Promjena statičke čvrstoće materijala ovisno o promjeni krutosti. ....  | 23        |
| Slika 3.20 Tipični slijed opterećenja za gornju površinu avionskog krila. ....   | 24        |
| Slika 3.21 Upliv kombiniranog opterećenja gornje površine avionskog krila. ....  | 24        |
| Slika 3.22 Koncentracija naprezanja. ....  | 25        |
| Slika 3.23 Faktor koncentracije naprezanja $\alpha_k$ i utjecaja konc. naprezanja $\beta_k$ . ....   | 25        |
| Slika 3.24 Ovisnost čvrstoće o koncentraciji naprezanja. ....  | 26        |
| Slika 3.25 Upliv srednjeg naprezanja kod različitih čelika. ....   | 26        |
| Slika 3.26 Osjetljivost materijala na razinu srednjeg naprezanja. ....   | 27        |
| Slika 3.27 Upliv hladne preddeformacije na odnos naprezanje-deformacija kod različitih čelika. ....  | 27        |
| Slika 3.28 Upliv preddeformacije na vijek trajanja. ....   | 28        |
| Slika 3.29 Upliv nuklearnog zračenja na čvrstoću. ....   | 28        |
| Slika 3.30 Čvrstoća čeličnog lijeva G-X CrNi134 Kaplanove lopatice ( $\sigma_M > 750$ MPa, $\sigma_{0,2} > 600$ MPa). ....                         | 29        |
| Slika 3.31 Način i program ispitivanja za određivanje podnošljivog opterećenja u pojedinim područjima automobilske industrije. ....                | 29        |
| Slika 3.32 Čvrstoća osovine kotača pri promjenljivom opterećenju. ....   | 30        |
| Slika 3.33 Čvrstoća osovine kotača ovisno o uvjetima ispitivanja. ....   | 30        |
| Slika 3.34 Poredba čvrstoće za pojedine izvedbe osovine kotača. ....   | 31        |
| Slika 3.35 Upliv materijala, konstrukcijske i tehnološke obrade na vijek trajanja. ....  | 31        |
| Slika 3.36 Optimiranje čvrstoće pri koroziji na trenje. ....   | 32        |
| Slika 3.37 Povećanje vijeka trajanja utora. ....   | 32        |
| Slika 3.38 Upliv obrade i konstrukcijskog rješenja na vijek trajanja. ....   | 33        |
| Slika 3.39 Wöhlerove krivulje za osnovni materijal i za zavar. ....  | 33        |
| Slika 3.40 Pogonska čvrstoća tipičnih zavarenih spojeva od konstrukcijskih čelika. ....  | 34        |
| Slika 3.41 Rezultati ispitivanja na zavarenome spoju i izračunate vrijednosti prema Modificiranom Mineru. ....                                     | 34        |
| Slika 3.42 Rezultati ispitivanja s promjenjivom amplitudom naprezanja točkasto zavarenih i zakovanih uzoraka. ....                                 | 35        |
| Slika 3.43 Dozvoljena naprezanja kod $2 \times 10^6$ opterećenja konstantne amplitude savijanjem. ....   | 35        |
| Slika 3.44 Dozvoljena naprezanja kod $1 \times 10^7$ ciklusa. ....   | 36        |
| <b>4. Metode procjene vijeka trajanja. ....</b>  | <b>37</b> |
| Slika 4.1 Koncepti proračuna vijeka trajanja. ....   | 37        |
| Slika 4.2 Linearna akumulacija zamora (Palmgren - Miner). ....   | 37        |
| Slika 4.3 Proračun vijeka trajanja (shematski). ....   | 38        |
| Slika 4.4 Shematski odnos između vijeka trajanja kod pravilno i nepravilno promjenjivih opterećenja, ovisno o metodi proračuna. ....               | 38        |
| Slika 4.5 Proračun vijeka trajanja po lokalnim naprezanjima. ....  | 39        |
| Slika 4.6 Određivanje vijeka trajanja relativnim Minerovim proračunom. ....  | 39        |
| Slika 4.7 Proračun vijeka trajanja po lokalnim deformacijama. ....   | 40        |
| Slika 4.8 Određivanje čimbenika zamora. ....   | 40        |
| Slika 4.9 Uzimanje probnih epruveta. ....  | 41        |
| Slika 4.10 Oblik, dimenzije i materijal osovine teretnog vozila. ....  | 41        |
| Slika 4.11 Krivulja deformacija-naprezanje. ....   | 42        |
| Slika 4.12 Krivulja čvrstoće pri kontriliranim deformacijama kriterij oštećenja: inicijalna pukotina $1 \text{ mm}^2$ ( $a < 1 \text{ mm}$ ). .... | 42        |
| Slika 4.13 Pogonska čvrstoća glavčine određena eksperimentalno i proračunom. ....  | 43        |
| Slika 4.14 Pogonska čvrstoća rukavca određena eksperimentalno i proračunom. ....   | 43        |
| Slika 4.15 Faktori korekcije kod teorijske procjene vijeka trajanja (samo orijentacijske vrijednosti). ....  | 44        |
| Slika 4.16 Kriterij za procjenu komponenti iz ojačanih plastika. ....  | 44        |
| Slika 4.17 Postupak procjene komponenti iz ojačanih plastika. ....   | 45        |
| Slika 4.18 Simulacija spektra pogonskog opterećenja na osovnici i glavčini kotača. ....  | 46        |
| Slika 4.19 Konstrukcijski spektar naprezanja za 500000km i Wöhlerova krivulja. ....  | 46        |
| Slika 4.20 Motorcicl s prikolicom. ....  | 47        |
| Slika 4.21 Okvir lakog motorcikla i raspored tenzometara. ....   | 47        |
| Slika 4.22 Određivanje "žarišnog" naprezanja. ....   | 48        |

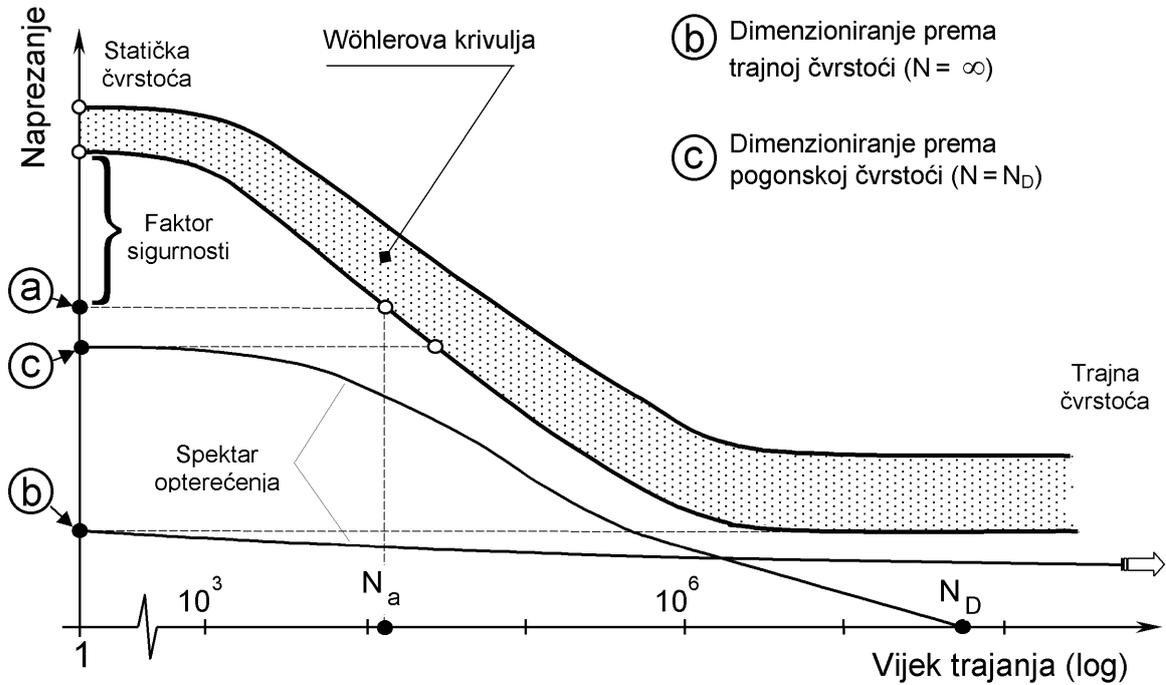
|  |           |
|--|-----------|
| Slika 4.23 Ispitivani uzorci zavarenih cijevi (materijal St 35) .....  | 48        |
| Slika 4.24 Čvrstoća pod promjenljivim opterećenjima zavarenih cijevi (materijal St 35).....  | 49        |
| Slika 4.25 Promjena pogonskih naprezanja.....  | 49        |
| Slika 4.26 Spektri pojedinih vrsta opterećenja i procjena oštećenja .....  | 50        |
| Slika 4.27 Određivanje sila na vozilu Ferrari Testarossa pomoću mjernog kotača "VELOS 8J x 18" .....   | 50        |
| Slika 4.28 Izmjerene deformacije na kritičnim mjestima.....  | 51        |
| Slika 4.29 Poredba proračuna za 300 000 km ispitnog spektra (područje F3) .....  | 51        |
| Slika 4.30 Poredba proračuna za 300 000 km ispitnog spektra (područje F5) .....  | 51        |
| Slika 4.31 Utjecaj proizvodnog postupka na vijek trajanja .....  | 52        |
| Slika 4.32 Dvoosni simulator za ispitivanje kotača.....  | 52        |
| <b>Primjer visokobrzinskog vlaka ICE 2 njemačkih željeznica.....</b>   | <b>53</b> |
| Slika 4.33 Visokobrzinski vlak ICE 2 njemačkih željeznica (2 lokomotive i 11 vagona) .....   | 53        |
| Slika 4.34 Osovinski sklop podvozja vagona visokobrzinskog vlaka njemačkih željeznica ICE 2 .....  | 53        |
| Slika 4.35 Konstrukcija višedijelnog elastičnog kotača BA 064.....   | 54        |
| Slika 4.36 Promjena naprezanja u točki A naplatka kotača, debljine $t=60$ mm do 30 mm .....  | 54        |
| Slika 4.37 Kolektiv naprezanja u prvoj godini ( $D=920$ mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ) .....                                   | 56        |
| Slika 4.38 Kolektiv naprezanja u drugoj godini ( $D=905$ mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ).....                                   | 56        |
| Slika 4.39 Kolektiv naprezanja u trećoj godini ( $D=890$ mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ) .....                                  | 56        |
| Slika 4.40 Kolektiv naprezanja u četvrtoj godini ( $D=875$ mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ) .....                                | 57        |
| Slika 4.41 Kolektiv naprezanja u petoj godini ( $D=860$ mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ) .....                                   | 57        |
| Slika 4.42 Ovisnost zamora o promjeru kotača .....   | 57        |
| Slika 4.43 Simulator za eksperimentalnu provjeru čvrstoće osovina i kotača vlakova .....   | 58        |
| Slika 4.44 Spektar opterećenja u pogonu (450 000 km) i eksperimentalnoj provjeri (40 000 km), .....  | 58        |
| promjer kotača $D=860$ mm.....   | 58        |
| <b>5. Utjecaji na pogonsku čvrstoću konstrukcija – uvjeti za optimalno dimenzioniranje.....</b>  | <b>60</b> |
| Slika 5.1 Metodika optimalnog dimenzioniranja konstrukcija .....   | 60        |
| Slika 5.2 Odnos naprezanja i vijeka trajanja .....   | 60        |
| Slika 5.3 Provjera pogonske čvrstoće komponenti zavješena vozila .....   | 61        |
| Slika 5.4 Mješalice kemijskih postrojenja.....   | 61        |
| Slika 5.5 Osnovna i konačna izvedba spojke.....  | 62        |
| Slika 5.6 Spektar pogonskog opterećenja i Wöhlerove krivulje za osnovnu i konačnu izvedbu .....  | 62        |
| Slika 5.7 Ispitni stol za određivanje pogonske čvrstoće .....  | 63        |
| Slika 5.8 Ovisnost vijeka trajanja o izvedbi prirubnice kod sobne i povišene temperature.....  | 63        |
| Slika 5.9 Pogonska čvrstoća zavarenog spoja .....  | 64        |
| Slika 5.10 Pogonska čvrstoća glave okvira (materijal St 55-29).....  | 64        |
| Slika 5.11 Pобољшanja konstrukcije .....   | 64        |
| Slika 5.12 Pобољшanja konstrukcije .....   | 65        |
| Slika 5.13 Tipična raspodjele konc. naprezanja $\alpha_{k,t}$ na spoju nazubljene osovine i glavčine .....                                   | 66        |
| Slika 5.14 Ovisnost konc. naprezanja o dimenzijama osovine i glavčine .....  | 66        |
| Slika 5.15 Utjecaj površinske obrade i materijala na trajnu čvrstoću koljenastog vratila.....  | 67        |
| Slika 5.16 Porsche kotači od Al i Mg slitina .....   | 68        |
| Slika 5.17 Utjecaj kotača na naprezanja glavčine .....   | 68        |
| Slika 5.18 Metodika optimalnog dimenzioniranja konstrukcija .....  | 69        |
| <b>6. Uvjeti i metode za saniranje zamorom oštećenih konstrukcija.....</b>   | <b>70</b> |
| Slika 6.1 Procedura sanacije zamornih oštećenja .....  | 70        |
| <b>7. Primjena standarda i preporuka pri određivanju pogonske čvrstoće konstrukcija.....</b>   | <b>72</b> |
| Slika 7.1 Examples for Detail Categories of Eurocode for Fatigue Design (primjer standarda za varene čelične konstrukcije – EUROCODE 3)..... | 72        |
| Slika 7.2 Design Curves of Eurocode for Welded Structures (konstrukcije – Wöhlerove krivulje po EUROCODE 3) .....                            | 73        |
| Slika 7.3 Detail Categories for Welded Joints Between Members (primjer standarda za varene aluminijske konstrukcije EUROCODE 9).....         | 73        |

|   |    |
|---|----|
| Slika 7.4 S-N Curves for members welded joints between members (konstrukcije – Wöhlerove krivulje po EUROCODE 9). | 74 |
| Slika 7.5 Hot spot stress assesment of welded toes (dozvoljeno žarišno naprezanje po EUROCODE 9).                 | 74 |
| Slika 7.6 Propisi i preporuke za dokaz pogonske čvrstoće na području proizvodnih i energetskih postrojenja.       | 75 |
| Slika 7.7 Standardizirani spektri pogonskog opterećenja prema DIN 15018.  | 75 |
| Slika 7.8 Koeficijent sigurnosti prema različitim standardima.  | 76 |
| Slika 7.9 Procedure for Assesment of the Service Strength of Railway Coaches.                                     | 76 |
| Slika 7.10 Fatigue Evaluation.  |    |
| Slika 7.11 Evaluation based on standards (UIC 566, EN 12 663).  | 78 |
| Slika 7.12 Procjena pogonske čvrstoće vagona brze željeznice proizvedenog iz zavarenih Al - profila.              | 79 |
| Slika 7.13 Detalj vrata željezničkog vagona - uzorak za provjeru pogonske čvrstoće.                               | 80 |
| Slika 7.14 BMW - kardansko vratilo od lakih slitina.  | 80 |
| Slika 7.15 Podjela komponenti vozila obzirom na njihov značaj za sigurnost i funkcioniranje vozila.               | 81 |
| Slika 7.16 Vjerojatnost udesa i krivulje vijeka trajanja.   | 81 |
| Slika 7.17 Procedura proračuna vijeka trajanja.   | 82 |
| Slika 7.18 Definicija rasipanja pogonskog opterećenja.  | 82 |
| Slika 7.19 Vjerojatnost udesa i vijek trajanja.   | 83 |
| Slika 7.20 Rasipanje vijeka trajanja.   | 83 |
| Slika 7.21 Faktor rizika procjene srednje vrijednosti.  | 84 |
| Slika 7.22 Sistematika pogonske čvrstoće.   | 84 |
| ISPITNA PITANJA.  | 85 |
| PRILOG – Procjena vijeka trajanja za automobilske komponente.   | 86 |

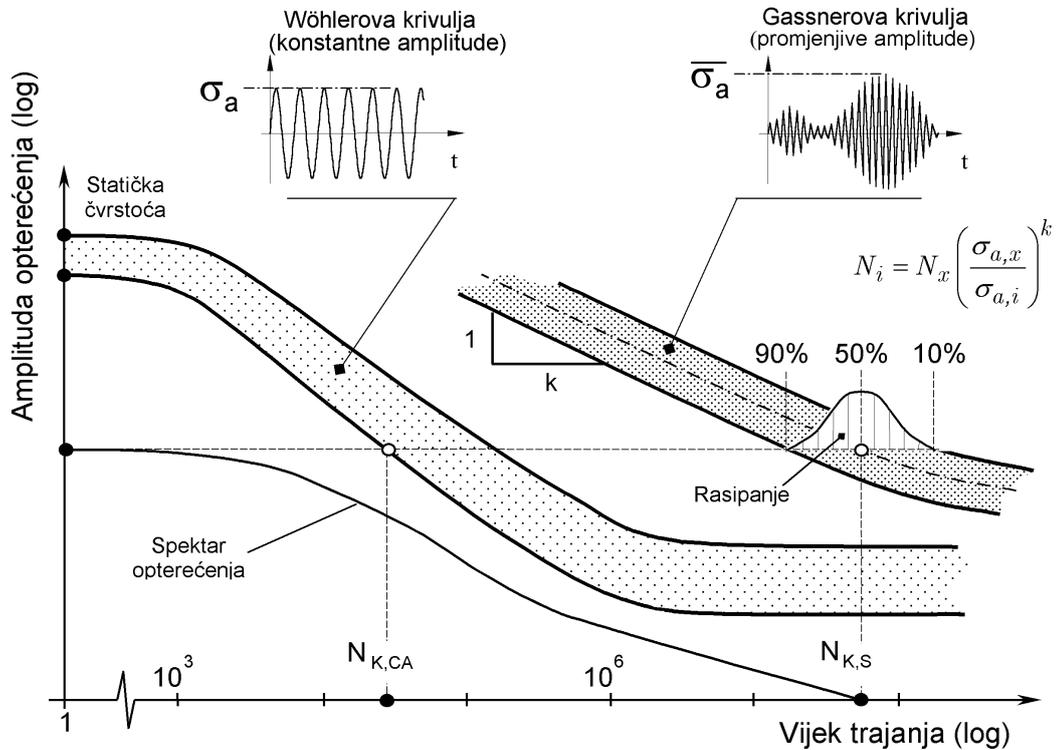
# 1. Uvod - zahtjevi za optimalno dimenzioniranje.

## 1.1 Metode određivanja pogonske čvrstoće - stanje znanosti i tehnike.

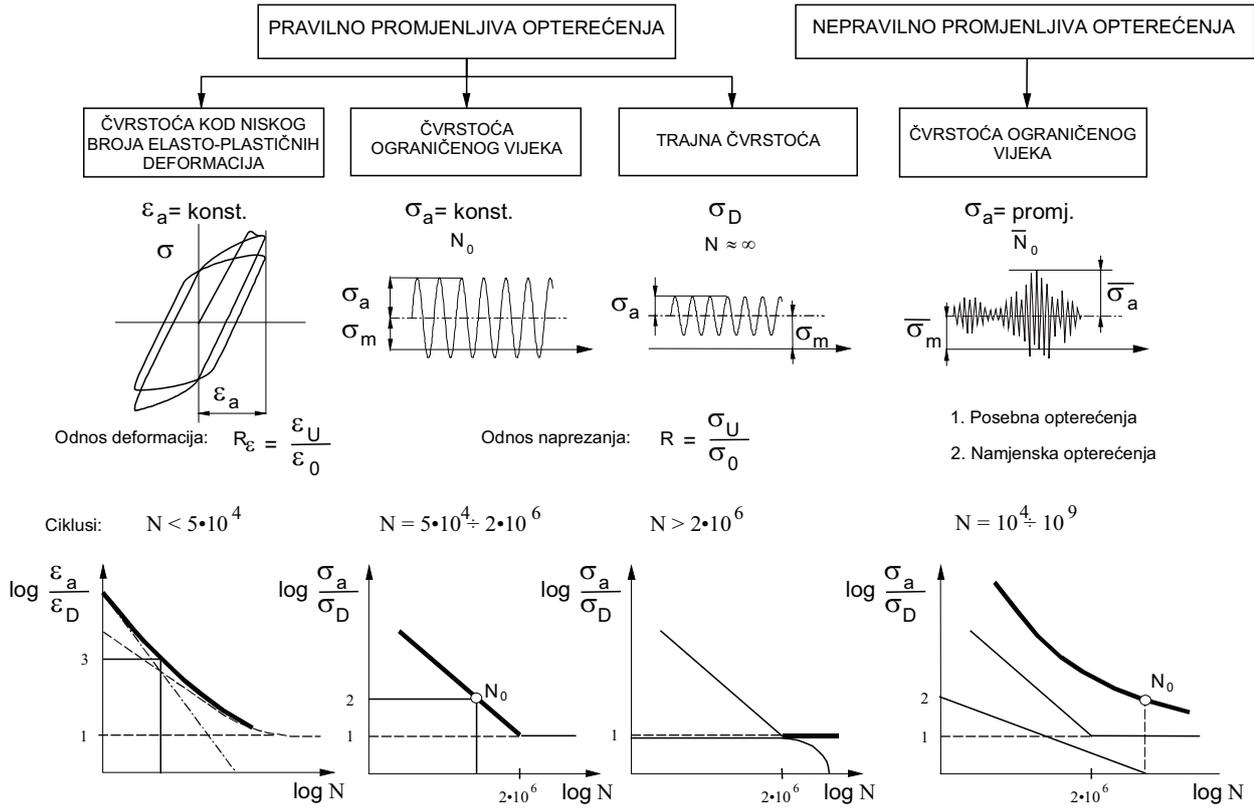
- (a) Dimenzioniranje prema statičkoj čvrstoći ( $N < N_a$ )
- (b) Dimenzioniranje prema trajnoj čvrstoći ( $N = \infty$ )
- (c) Dimenzioniranje prema pogonskoj čvrstoći ( $N = N_D$ )



Slika 1.1 Metode dimenzioniranja.



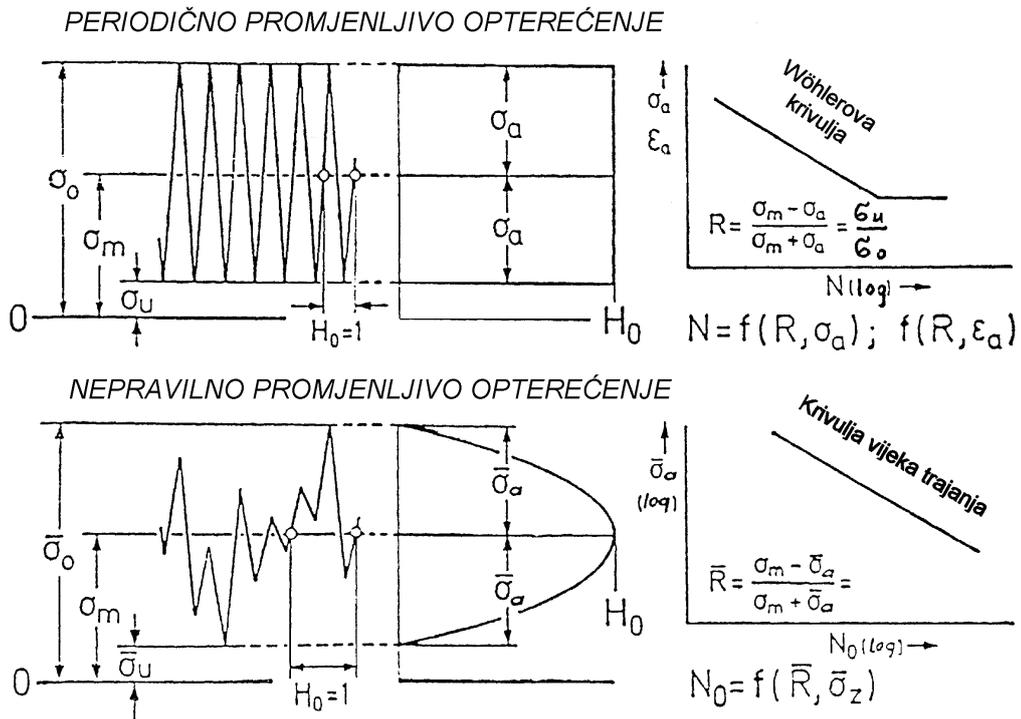
Slika 1.2 Odnos između pogonskog opterećenja i vijeka trajanja.



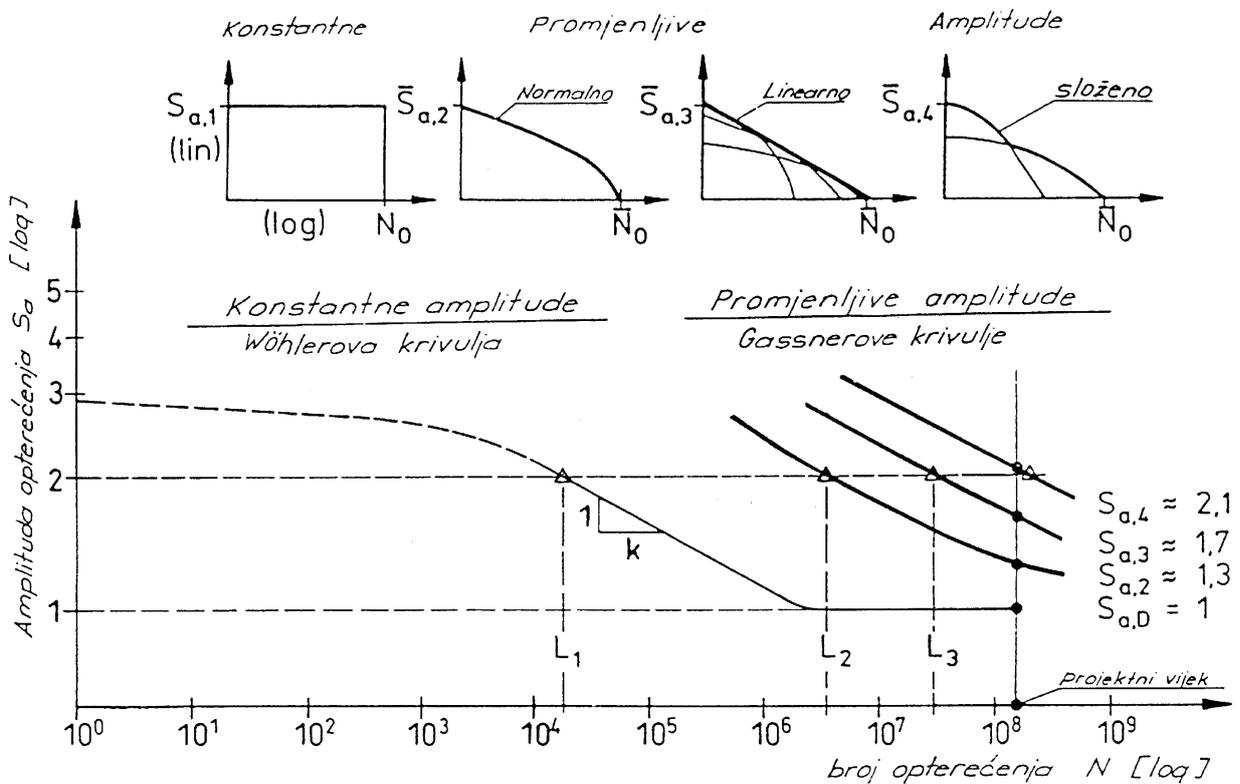
Slika 1.3 Podjela čvrstoće pri promjenljivim opterećenjima.



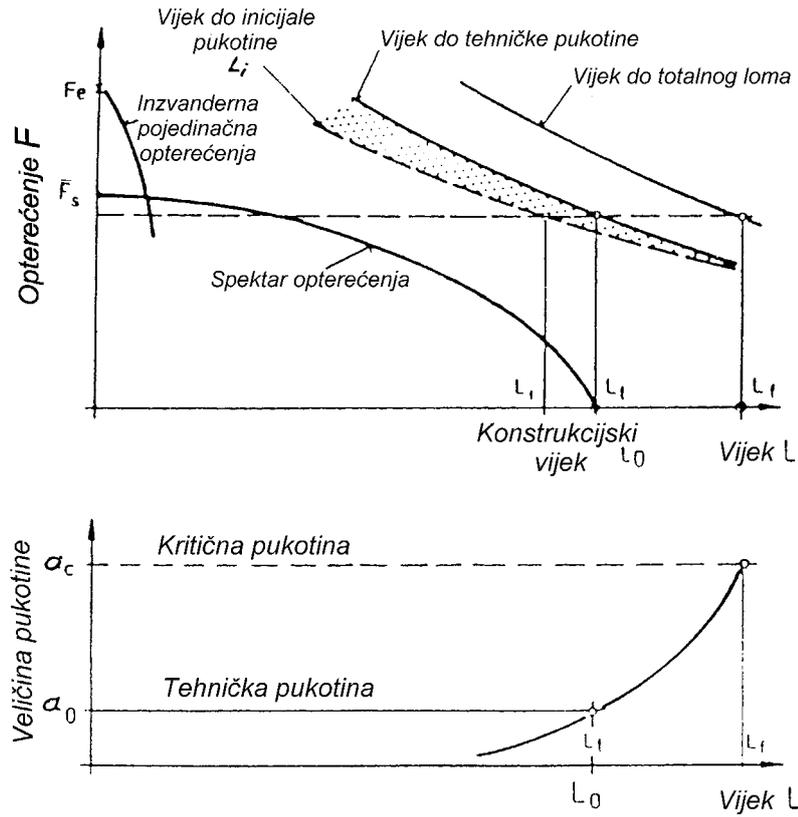
Slika 1.4 Utjecajne veličine na pogonsku čvrstoću.



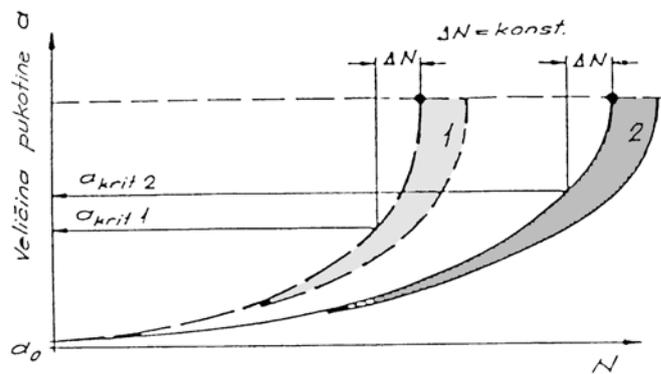
Slika 1.5 Vrsta opterećenja i vijek trajanja.



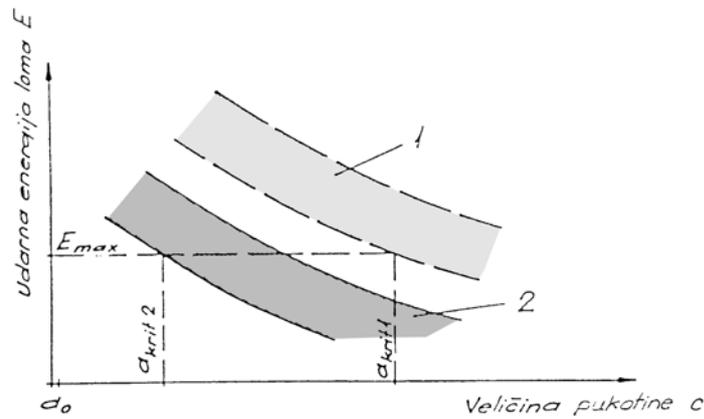
Slika 1.6 Upliv spektra opterećenja na zamornu čvrstoću.



Slika 1.7 Kriterij loma i vijek trajanja.



a) Nastanak loma kod promjenljivog opterećenja

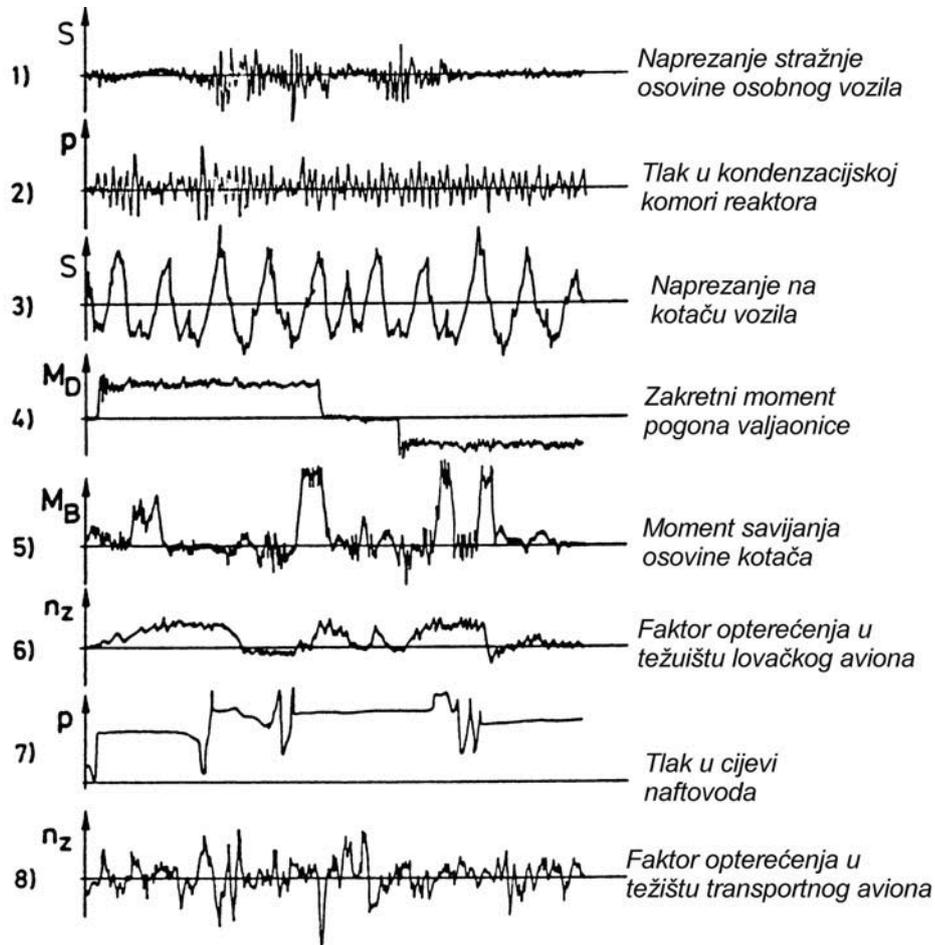


b) Nastanak loma pri udarnom opterećenju

Slika 1.8 Parametri za sigurnost na lom vitalnih komponenti.

## 2. Pogonska opterećenja.

### 2.1 Vrste pogonskih opterećenja.

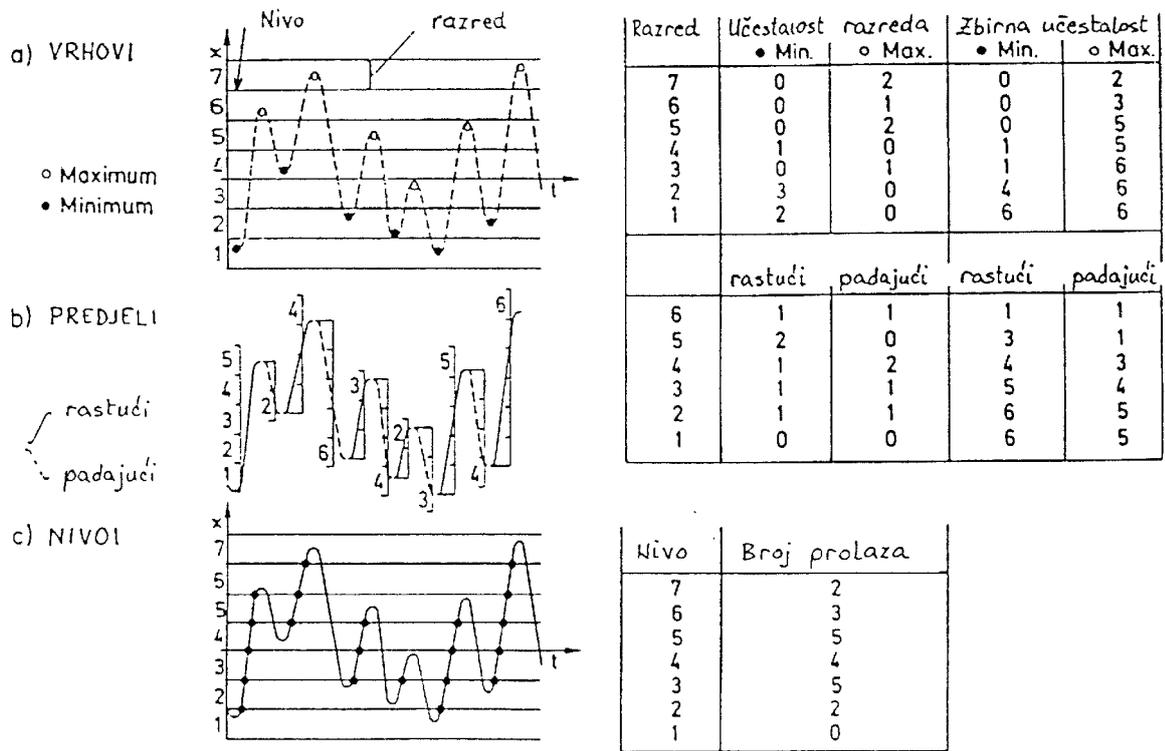


Slika 2.1 Primjeri izmjerenih tokova funkcija naprezanje-vrijeme.



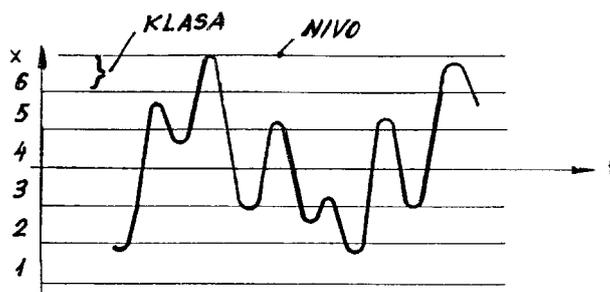
Slika 2.2 Izvori i podjela pogonskog opterećenja.

2.2 Sistematika pogonskih opterećenja – prikaz pogonskih opterećenja.

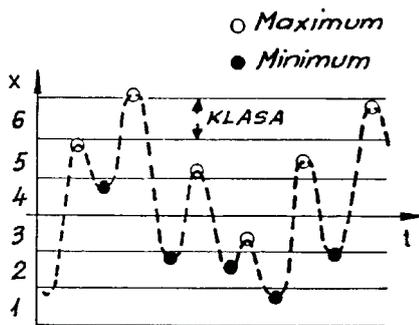


Slika 2.3 Osnovne statističke metode brojanja opterećenja.

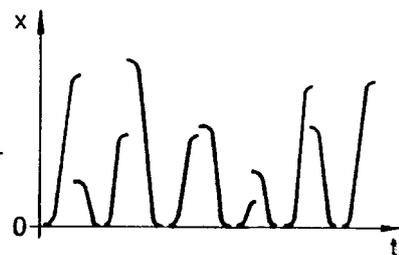
SLIJED POGONSKOG OPTEREĆENJA



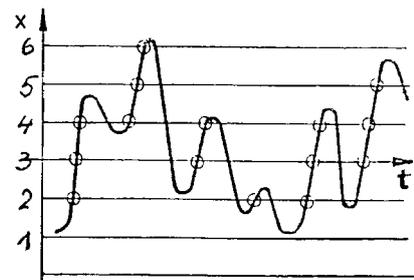
BROJANJE VRHOVA



BROJANJE PREDJELA



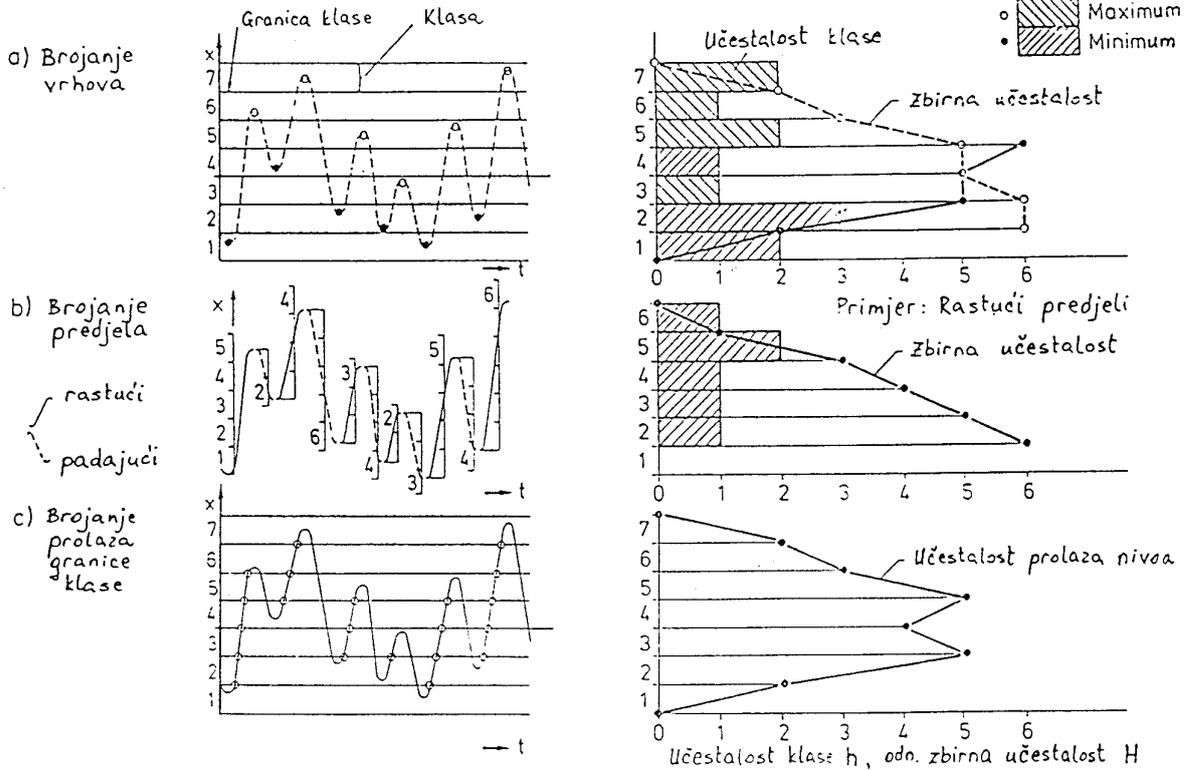
BROJANJE PROLAZA NIVOA



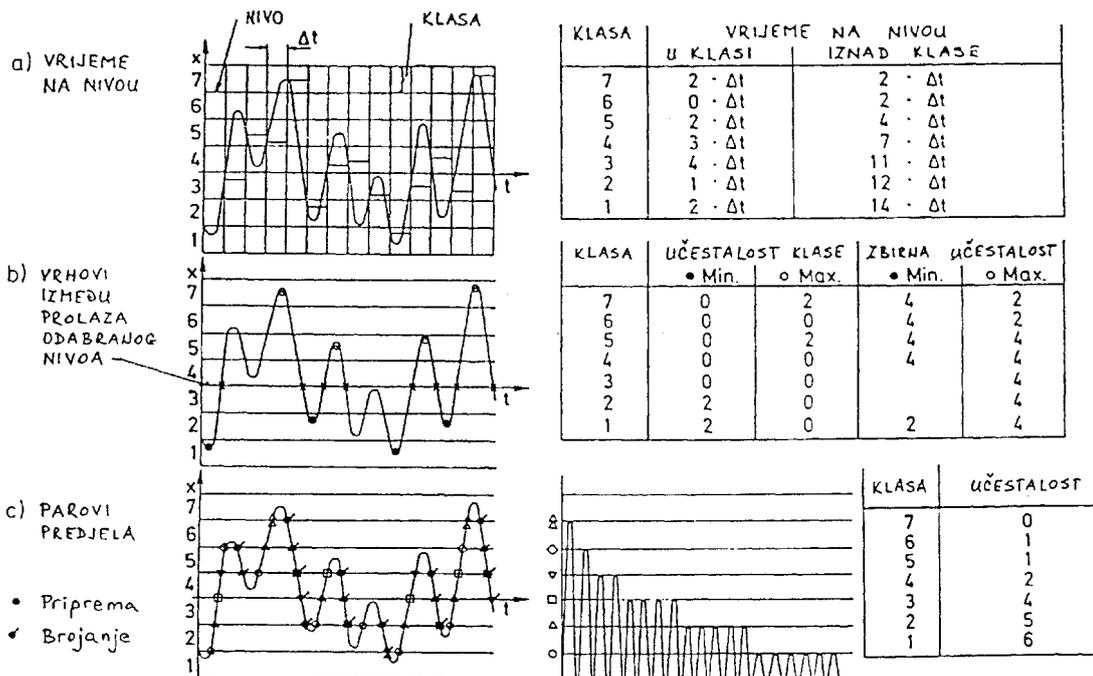
Slika 2.4 Osnovne metode analize poonskog opterećenja - gubitak srednje vrijednosti.

Metoda brojanja

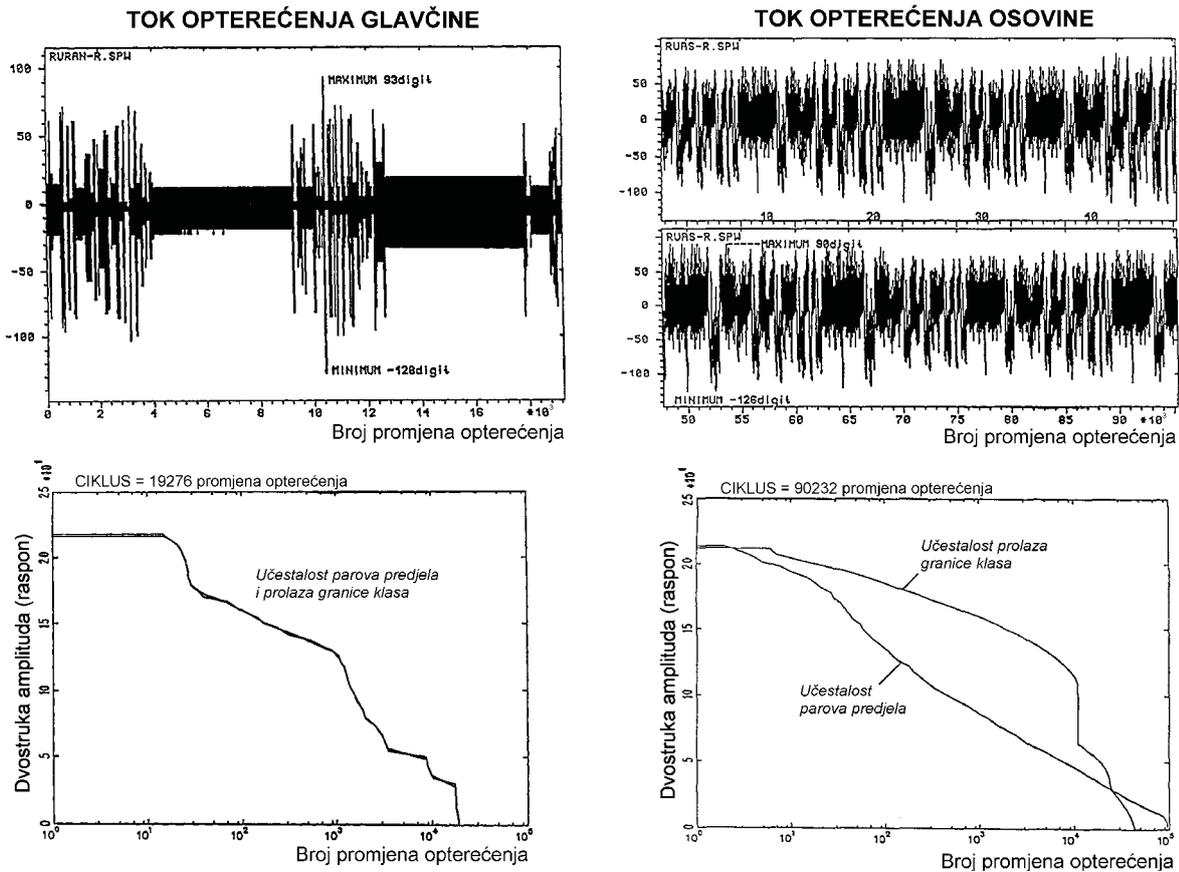
Spektar



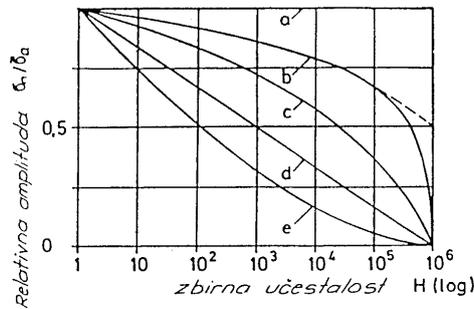
Slika 2.5 Osnovne metode brojanja – prikaz kao spektar.



Slika 2.6 Dodatne metode brojanja.



Slika 2.7 Srednja vrijednost toka opterećenja i spektar.



Matematski opis

$$H(\sigma_a) = H_0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_a}{s} \right)^n \right]$$

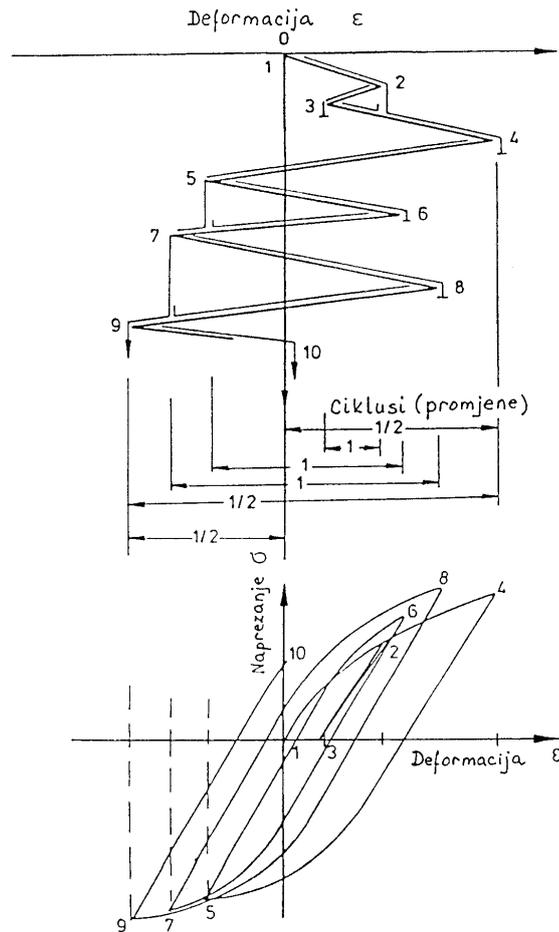
- a)  $n \rightarrow \infty$  : Konstantne granice
- b)  $n > 2$  : Približna normalna raspodjela
- c)  $n = 2$  : Gaussova normalna raspodjela

$$H(x) = 2 \cdot H_0 \left[ 1 / \sqrt{2\pi} \int_x^\infty \exp \left( -\frac{a^2}{2} \right) da \right] \text{ uz } \sigma_a / \bar{\sigma}_a = 0,217 \cdot x$$

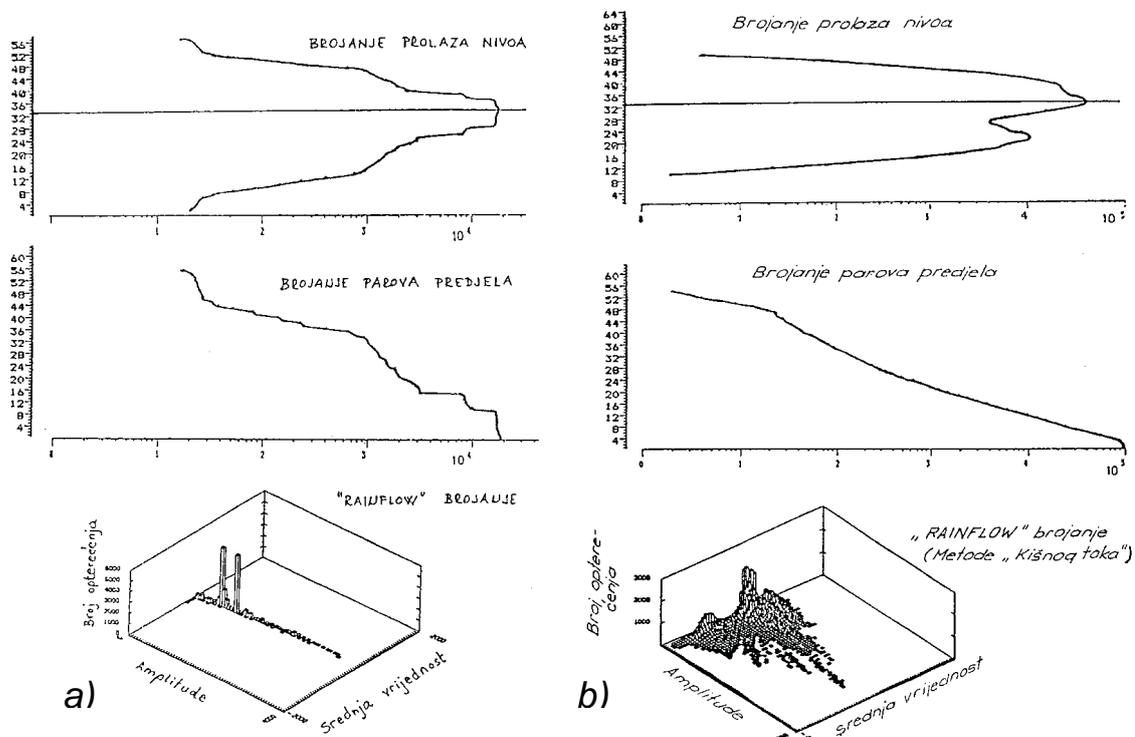
- d)  $n = 1$  : takozvana linearno raspodjela
  - e)  $n < 1$  : Približna log - normalna raspodjela
- Ako se radi o stohastičkim promjenam opterećenja d) i e) se mogu opisati - također

$$\text{sa} \quad H(\sigma_a) = H_0 \int_x^\infty \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_a}{s} \right)^2 \right] \cdot f(s) ds$$

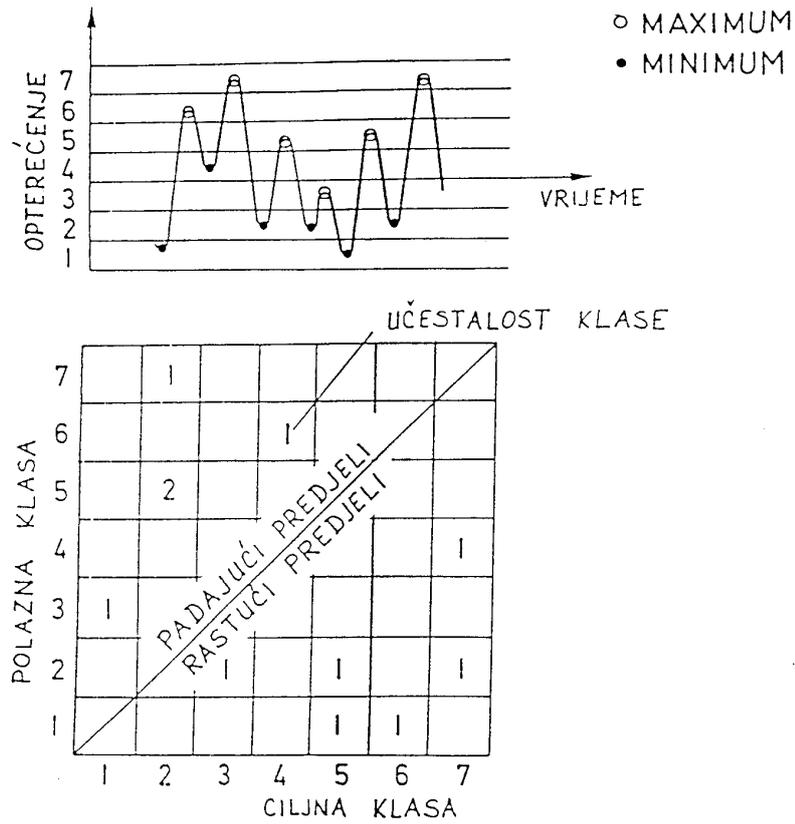
Slika 2.8 Vrste spektara pogonskih opterećenja.



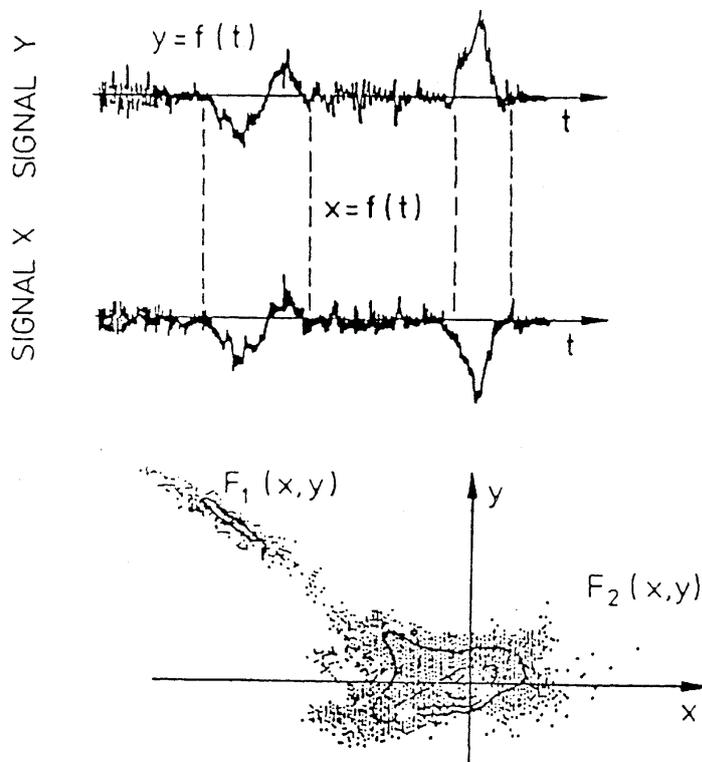
Slika 2.9 "RAIN FLOW" (kišni tok) - metoda brojanja i histeriza naprezanje-deformacija.



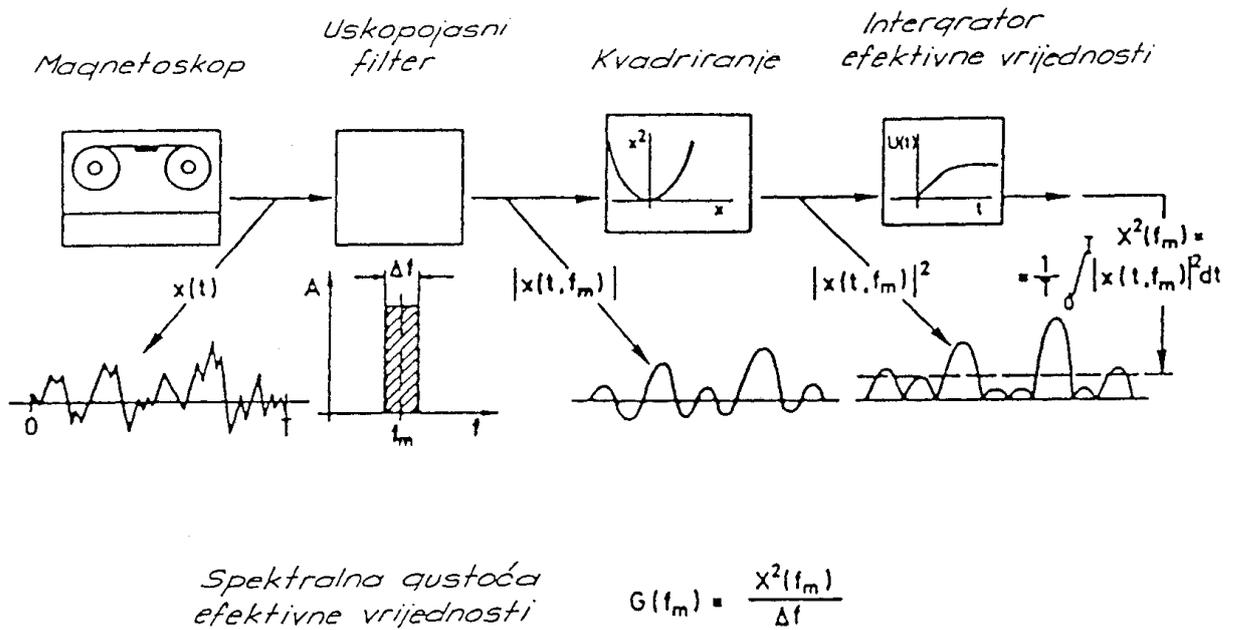
Slika 2.10 a) Brojanje toka deformacija jednog ciklusa opterećenja "EUROPSKI CIKLUS" glavčine kotača; b) Brojanje toka deformacija jednog ciklusa opterećenja rukavca osovine – tlačna strana.



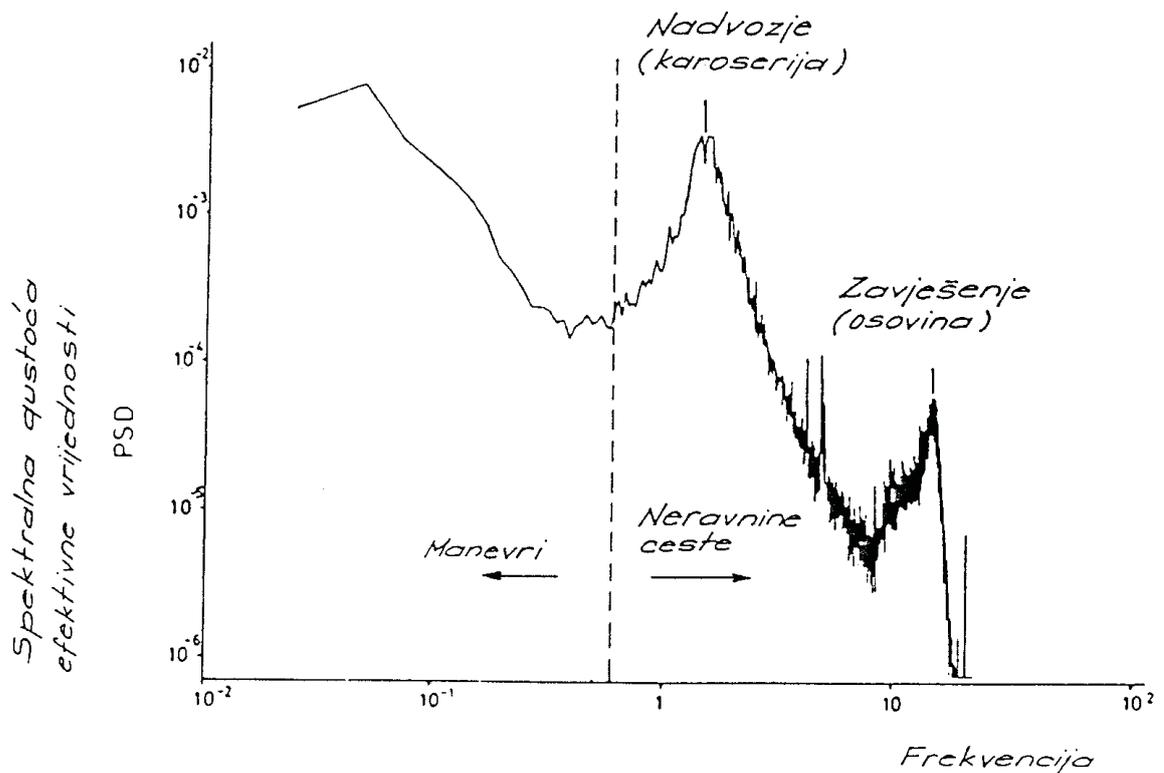
Slika 2.11 Metoda praćenja redoslijeda opterećenja.



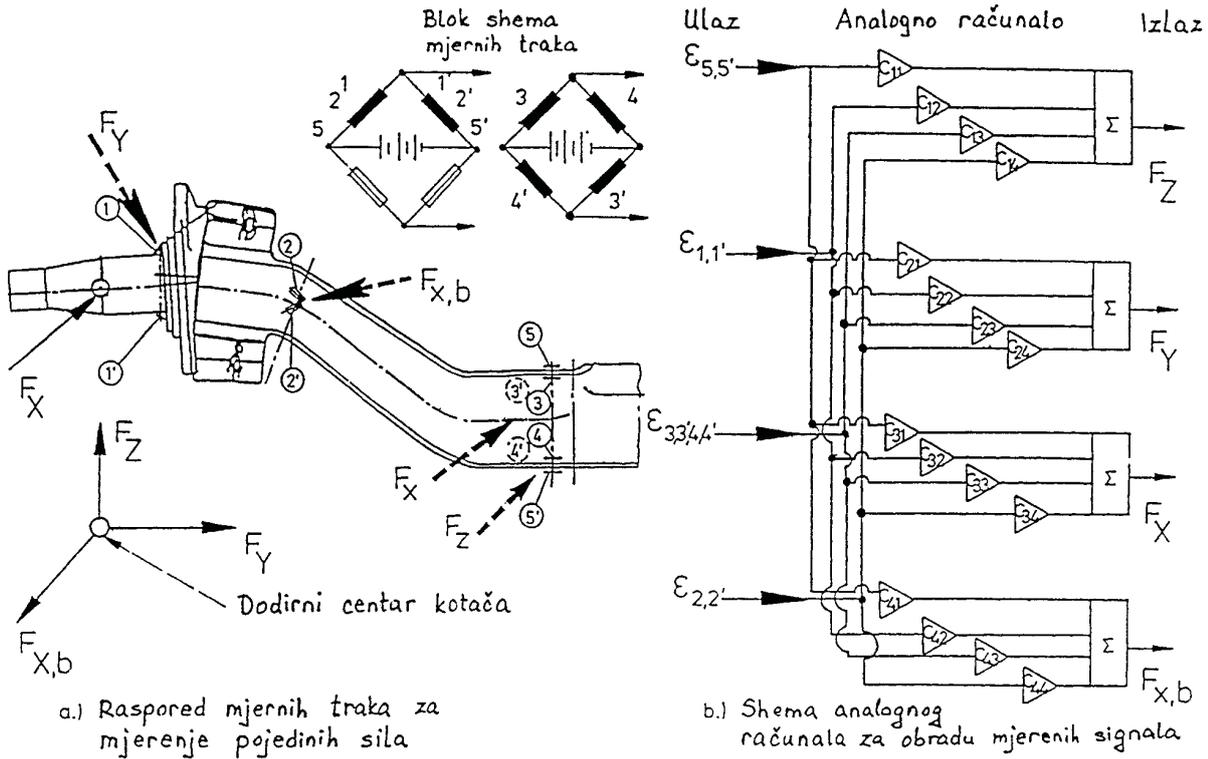
Slika 2.12 Korelacija dviju vrijednosti i njihovih učestalosti.



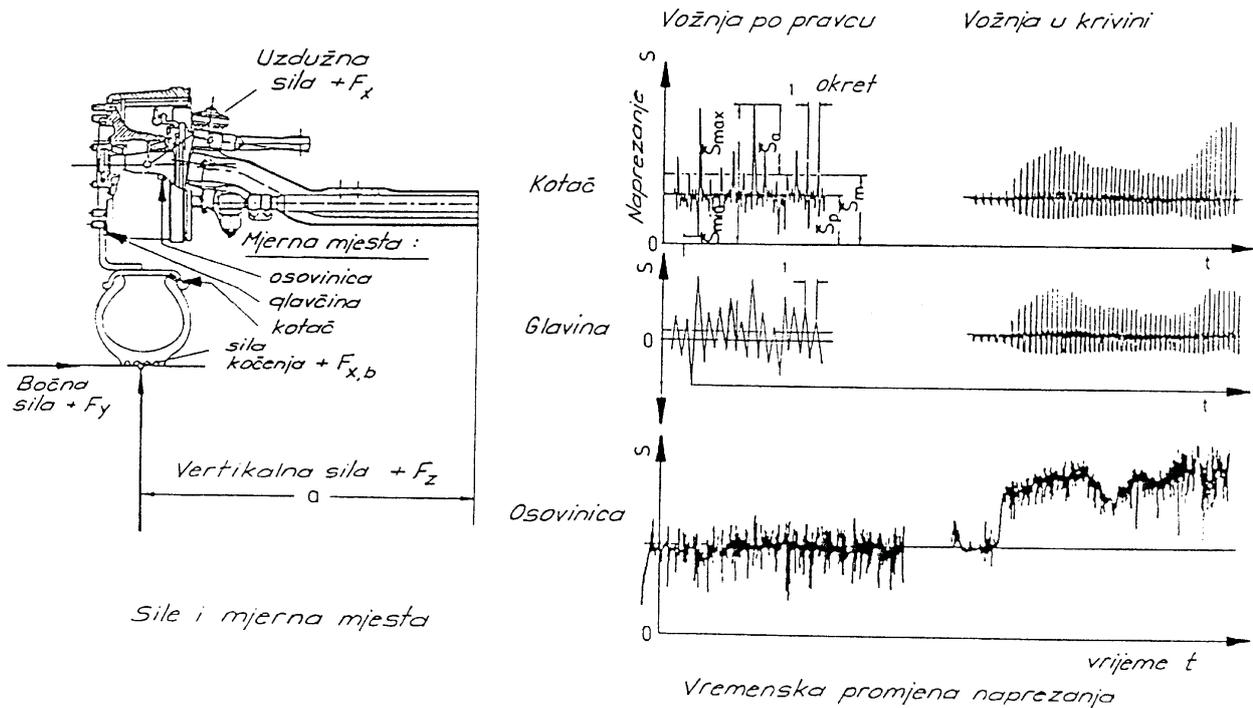
Slika 2.13 Analoga shema za proračun spektralne gustoće efektivne vrijednosti.



Slika 2.14 Spektralna gustoća efektivne vrijednosti zavješerja vozila.



Slika 2.15 Priprema osovine teretnog vozila za merenje sila.



Slika 2.16 Vremenska promjena naprezanja na pojedinim komponentama zavješnja.

| Opterećenje        | Faktor opterećenja         |                              |                 |           | Parametri spektra           |                   | Raspodjela |
|--------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|-----------|-----------------------------|-------------------|------------|
|                    | $n_z$                      | $n_y$                        | $n_x$           | $n_{x,b}$ | H                           | $H_e$             |            |
| Vožnja po pravcu   | $n_{z,s}$<br>$n_{z,s}$     | $\pm n_{y,s}$<br>-           | -<br>$+n_{x,s}$ | -         | $0,96 \cdot H_g$<br>-       | $H \cdot 10^{-6}$ | Linearna   |
| Vožnja u krivinama | $n_{z,c,a}$<br>$n_{z,c,i}$ | $+n_{y,c,a}$<br>$-n_{y,c,i}$ | -<br>-          | -<br>-    | $\frac{0,04 \cdot H_g}{20}$ | 50                | Normalna   |
| Kočenje            | $n_{z,b}$                  | -                            | -               | $n_{x,b}$ | $5 \cdot 10^5$              | $10^4$            | Normalna   |

pri čemu su:  $H_g$  - totalna učestalost  $H_g = L \cdot i$   
 $H$  - učestalost pojedinog spektra  
 $H_e$  - učestalost maksimalnih vrijednosti  
 $L$  - konstrukcijski vijek  
 $i$  - broj promjena opterećenja po km

Slika 2.17 Osnovni podaci za određivanje spektra pogonskog opterećenja.

## Opterećenja

## Naprezanja

- Statičko opterećenje  $F_{Z,stat} = 35$  kN

- Maksimalno dinamičko opterećenje pri vožnji po pravcu

$$\bar{n}_{z,s} = 2.28 \rightarrow \bar{F}_{z,s} = \bar{n}_{z,s} \cdot F_{z,stat} = 80 \text{ kN}$$

  dodatna poprečna sila

$$\bar{n}_{y,s} = \pm 0.35 \rightarrow \bar{F}_{y,s} = \pm 12 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,s} = \pm 255 \text{ MPa}$$

  ili dodatna uzdužna sila

$$\bar{n}_{x,s} = +0.50 \rightarrow \bar{F}_{x,s} = +18 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,s} = \pm 260 \text{ MPa}$$

- Maksimalno opterećenje pri vožnji u krivinama

$$\bar{n}_{z,k,a} = 1.5 \rightarrow \bar{F}_{z,k,a} = 52 \text{ kN}$$

$$\bar{n}_{y,k,a} = 0.9 \rightarrow \bar{F}_{y,k,a} = 31 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,k,a} = \pm 420 \text{ MPa}$$

$$\bar{n}_{z,k,i} = 0.5 \rightarrow \bar{F}_{z,k,i} = 17 \text{ kN}$$

$$\bar{n}_{y,k,i} = -0.4 \rightarrow \bar{F}_{y,k,i} = -14 \text{ kN}$$

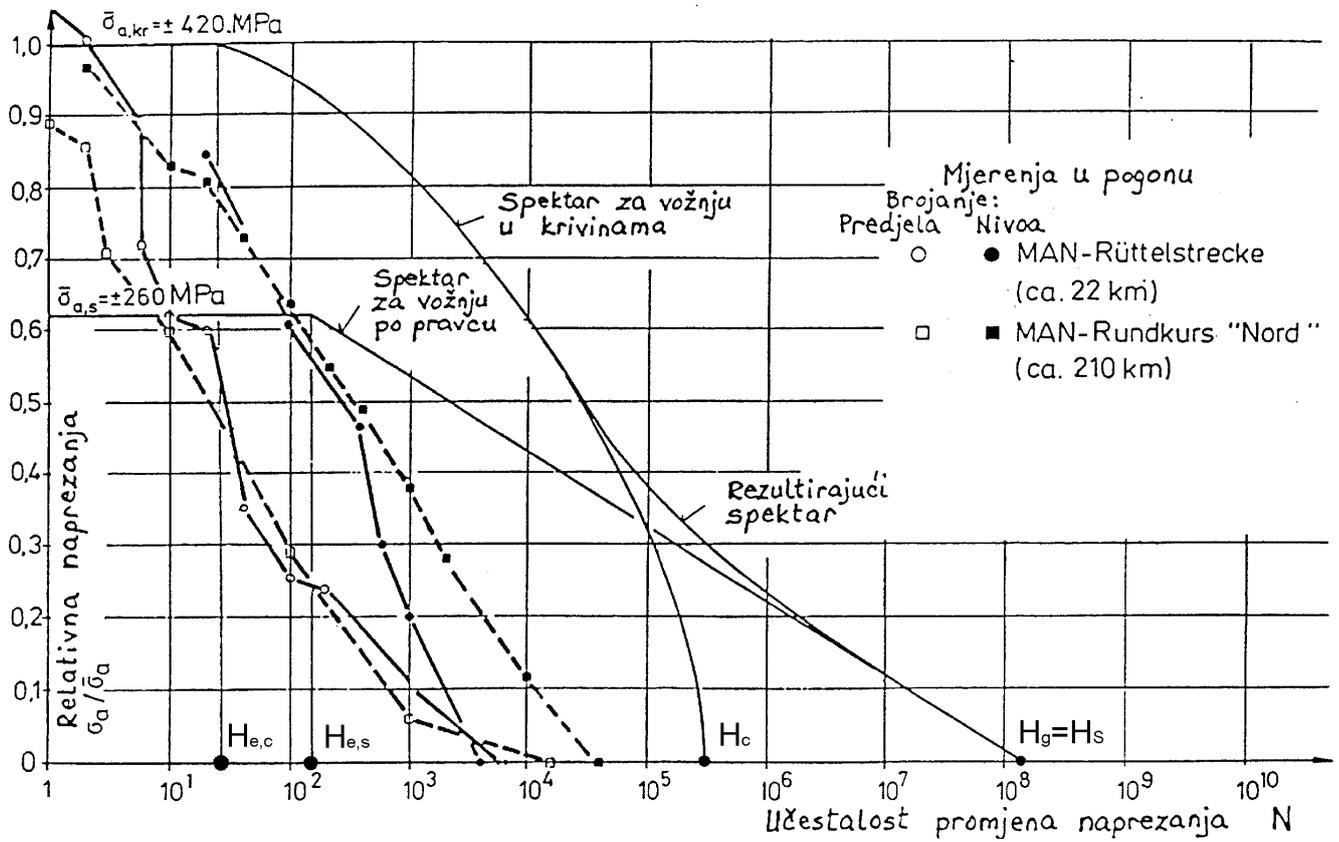
- Maksimalno opterećenje pri kočenju

$$\bar{n}_{z,b} = 2.2 \rightarrow \bar{F}_{z,b} = 77 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,b} = \pm 180 \text{ MPa}$$

$$\bar{n}_{x,b} = 1.4 \rightarrow \bar{F}_{x,b} = 49 \text{ kN}$$

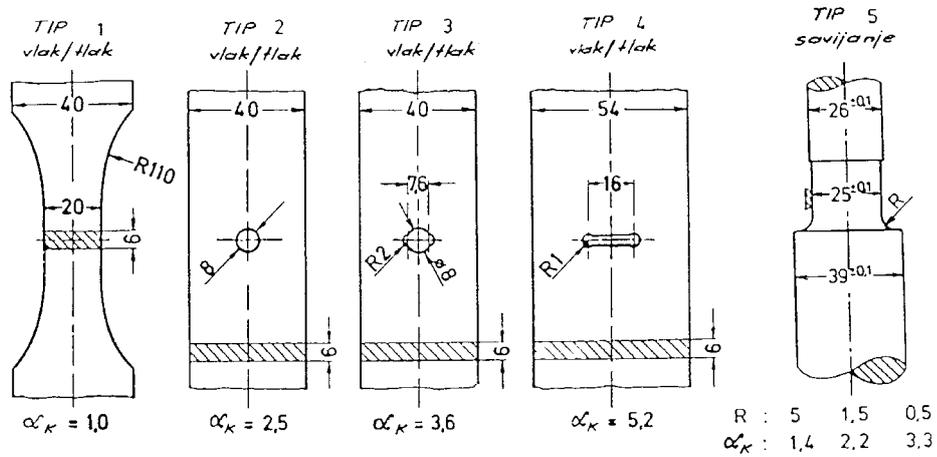
Slika 2.18 Primjer pogonskih opterećenja na prednjoj osovini nosivosti 7 tona (MAN).



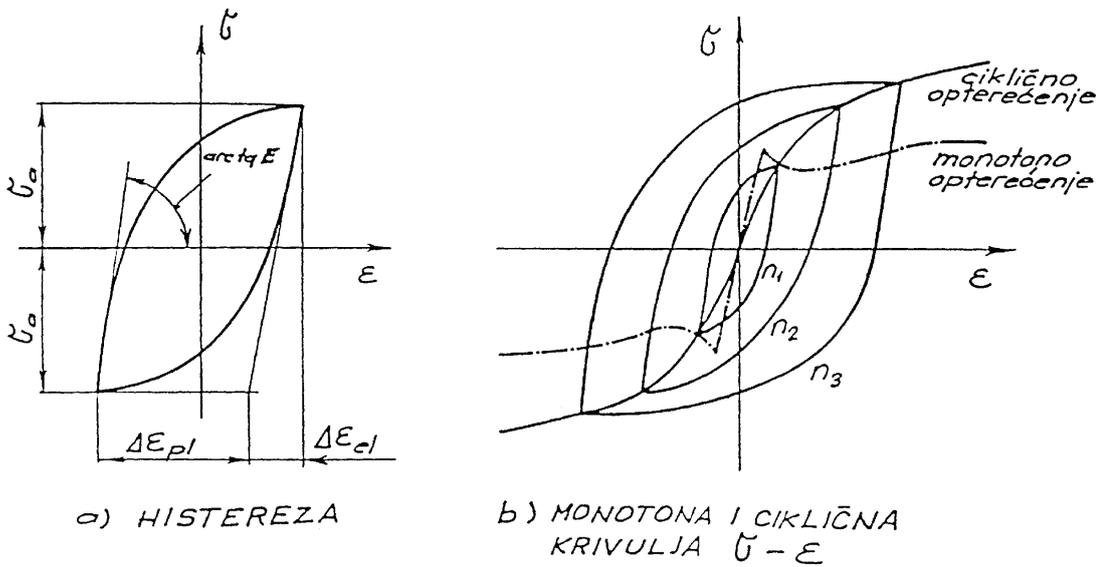
Slika 2.19 Poredba konstrukcijskog spektra naprezanja i mjerenja tvornice MAN.

### 3. Ponašanje materijala pri pogonskim opterećenjima.

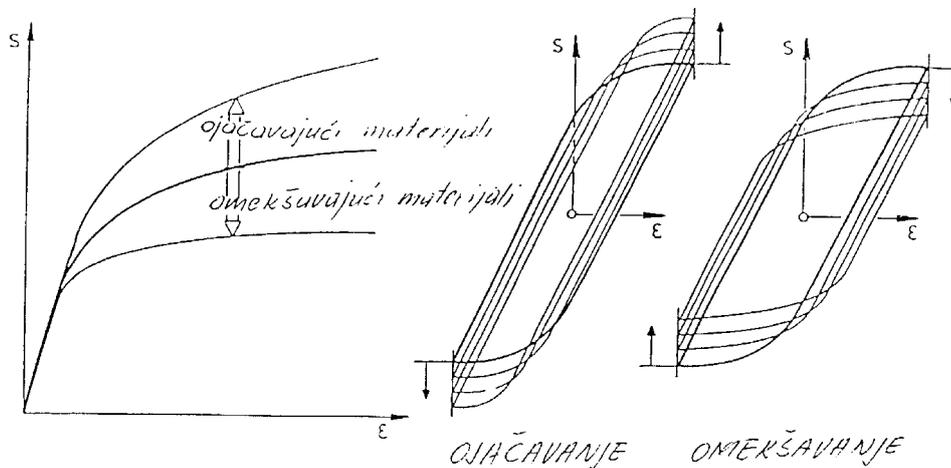
#### 3.1 Podaci potrebni za procjenu pogonske čvrstoće.



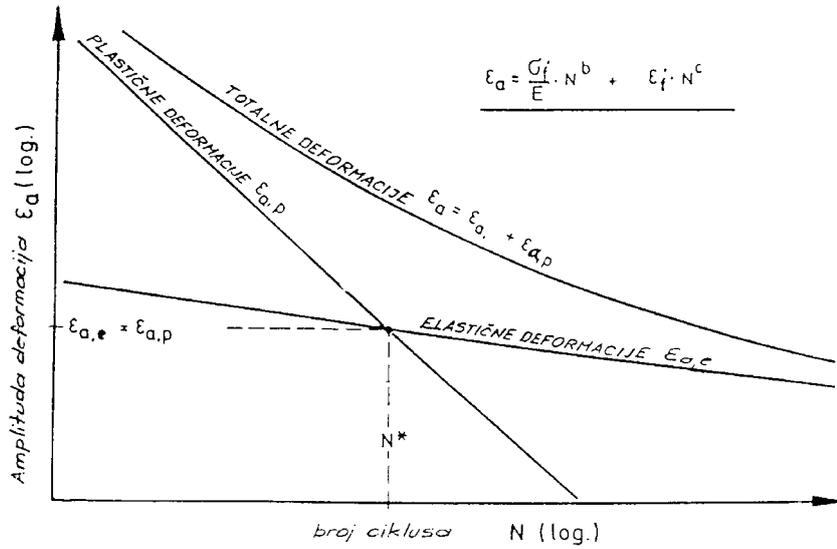
Slika 3.1 Tipovi probnih epruveta.



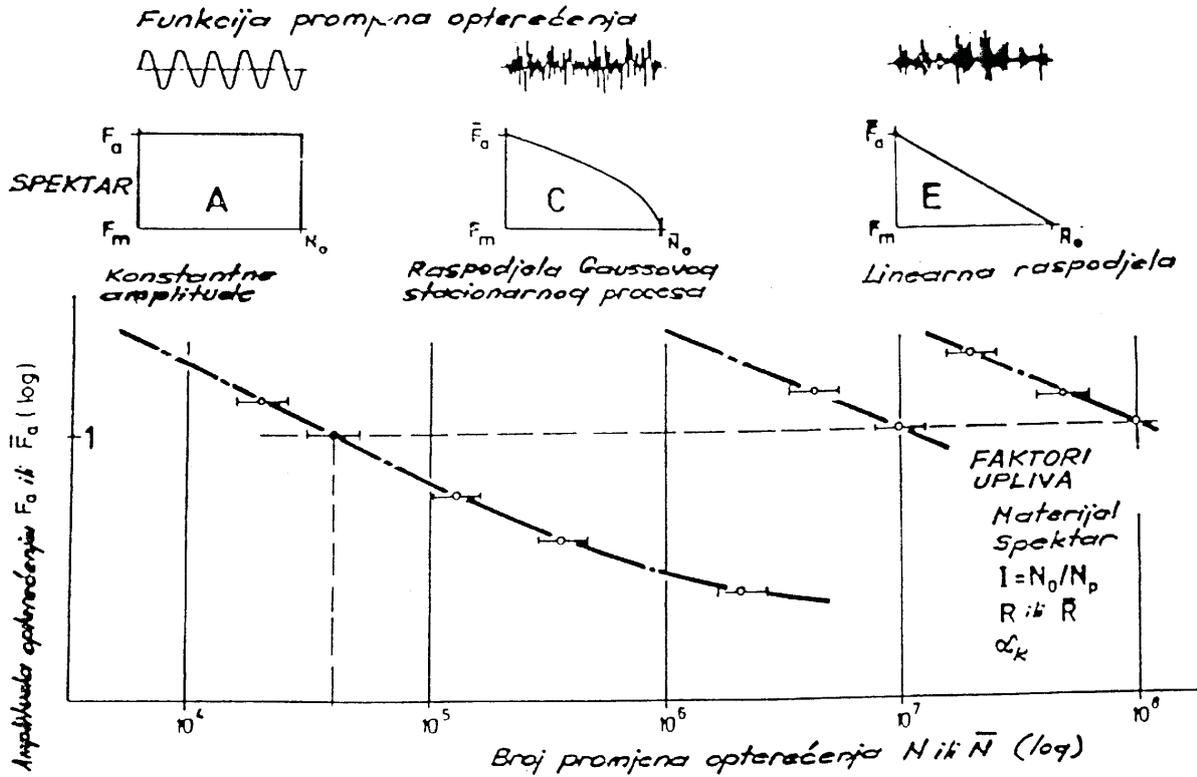
Slika 3.2 Odnos naprezanja i deformacija pri cikličkom opterećenju.



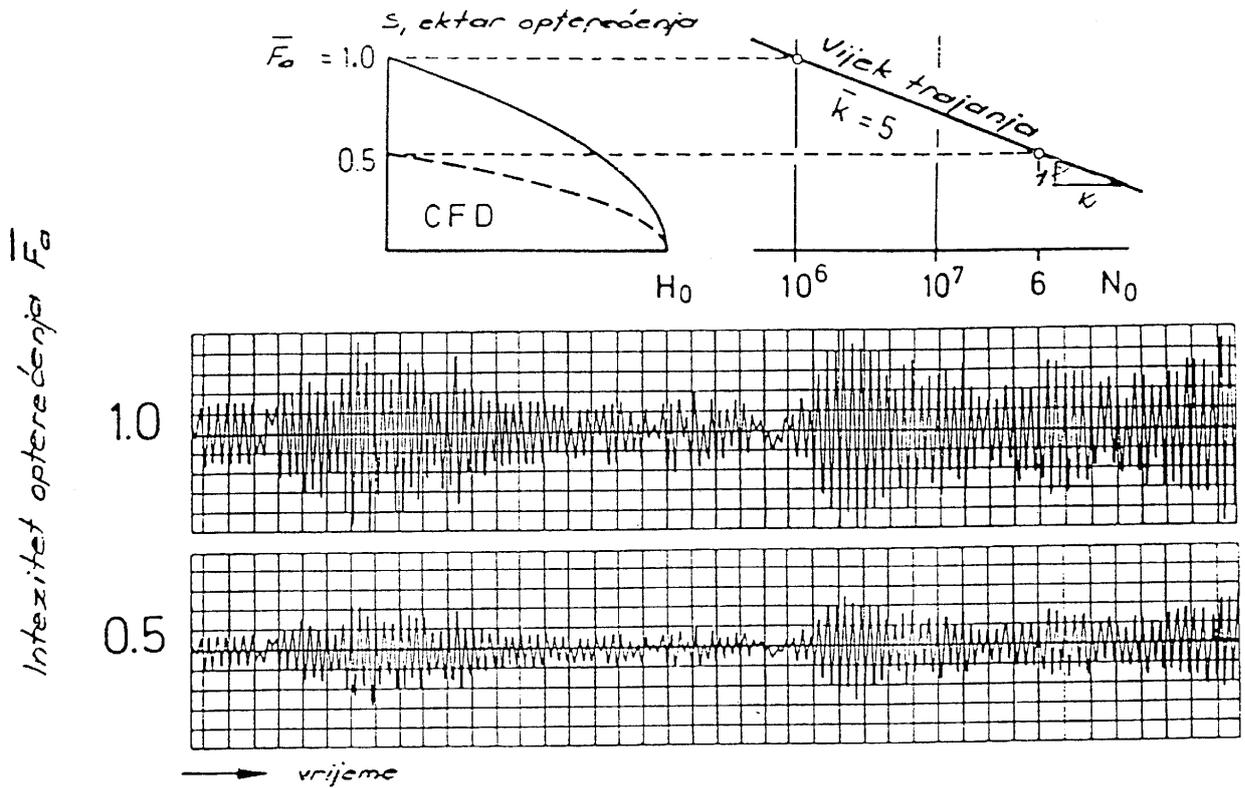
Slika 3.3 Cikličko očvršćenje i omekšavanje.



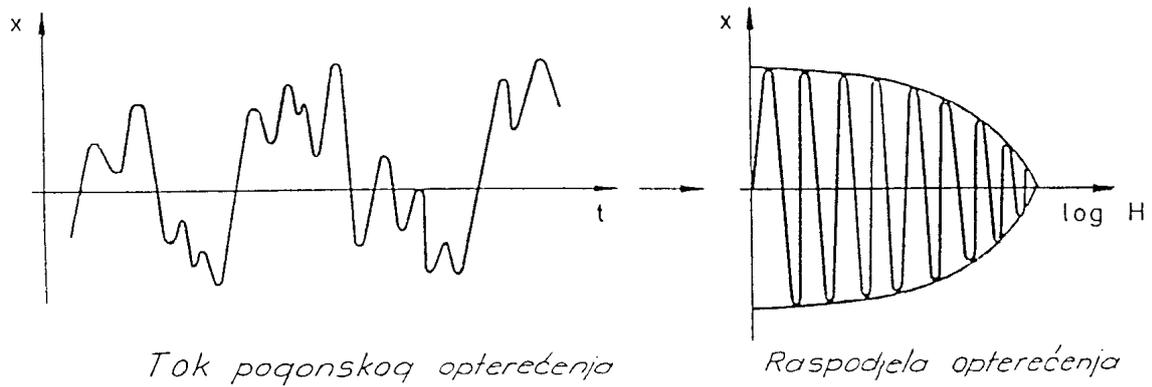
Slika 3.4 Vijek trajanja pri kontroliranim deformacijama.



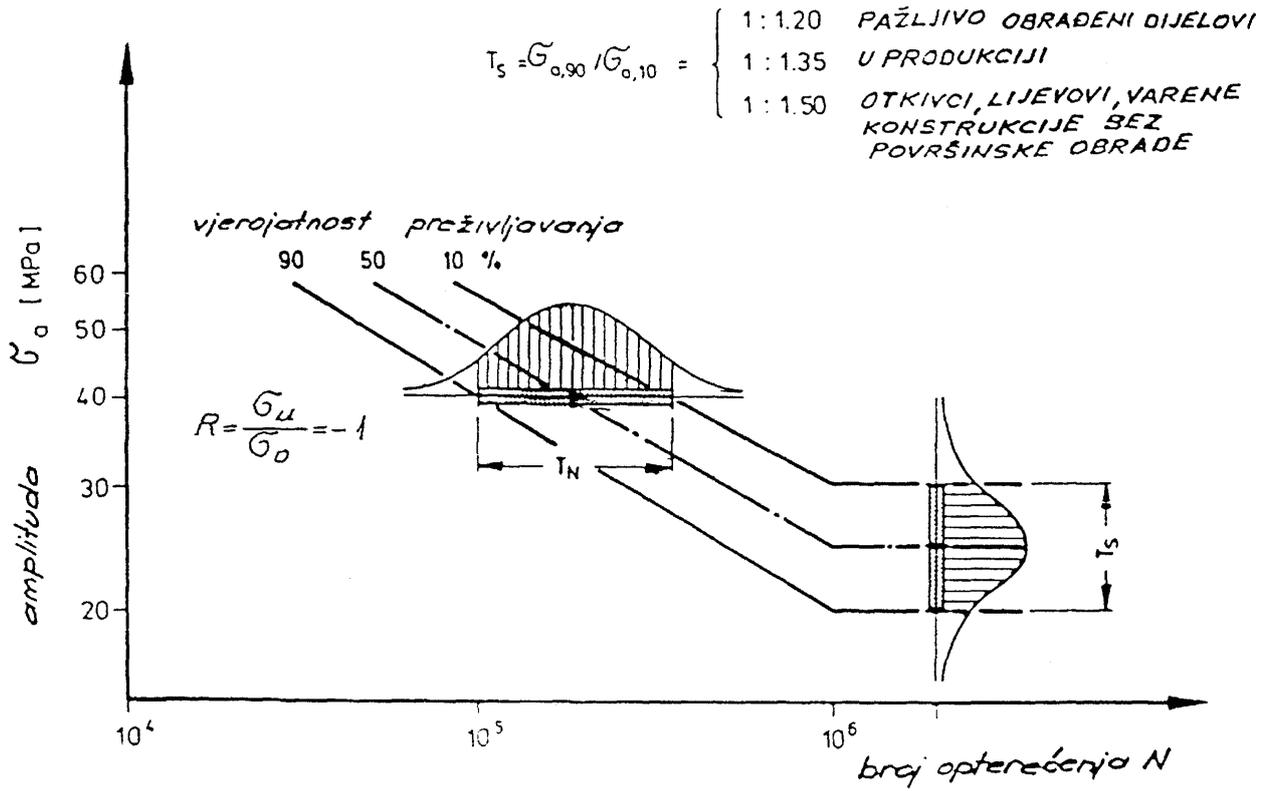
Slika 3.5 Vrsta opterećenja i vijek trajanja.



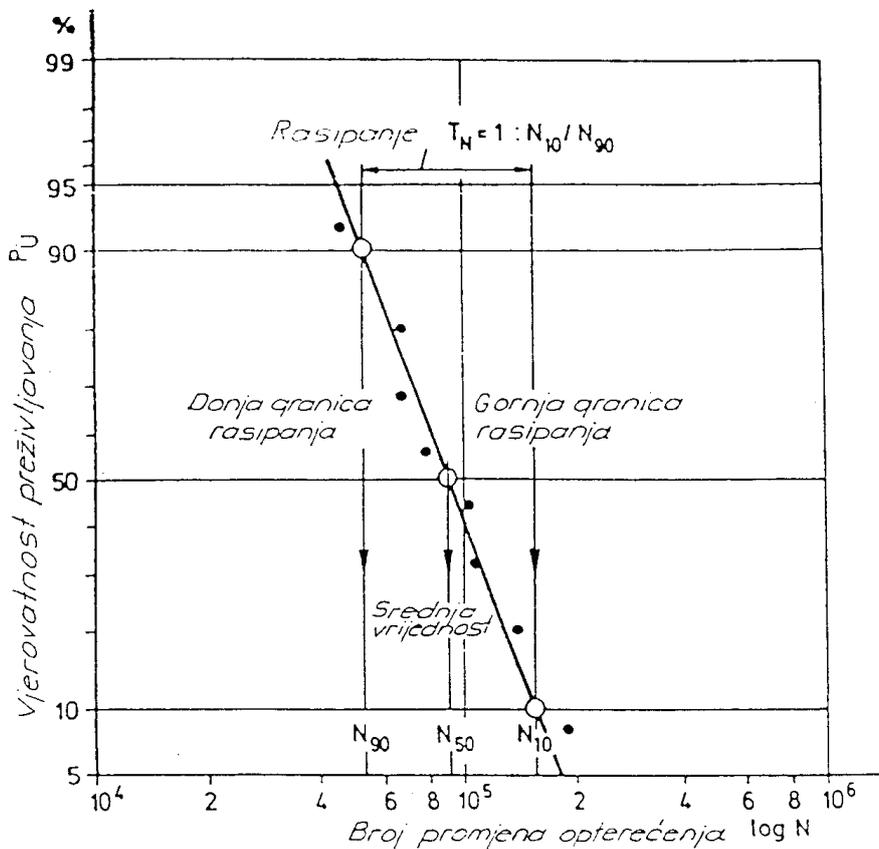
Slika 3.6 Upliv intenziteta opterećenja na vijek trajanja.



Slika 3.7 Faktor neregularnosti procesa.



Slika 3.8 Rasipanje čvrstoće.



$S_a = \text{konst.}$   
 $R = \text{konst.}$

$$P_U = \frac{3m-1}{3n+1} \cdot 100\%$$

| m   | N       | $P_U$ % |
|-----|---------|---------|
| 1   | 190 000 | 8       |
| 2   | 140 000 | 20      |
| 3   | 108 000 | 32      |
| 4   | 103 000 | 44      |
| 5   | 79 000  | 56      |
| 6   | 68 000  | 68      |
| 7   | 68 000  | 80      |
| n=8 | 46 000  | 92      |

Slika 3.9 Statistička obrada rezultata mjerenja – vremenska čvrstoća.

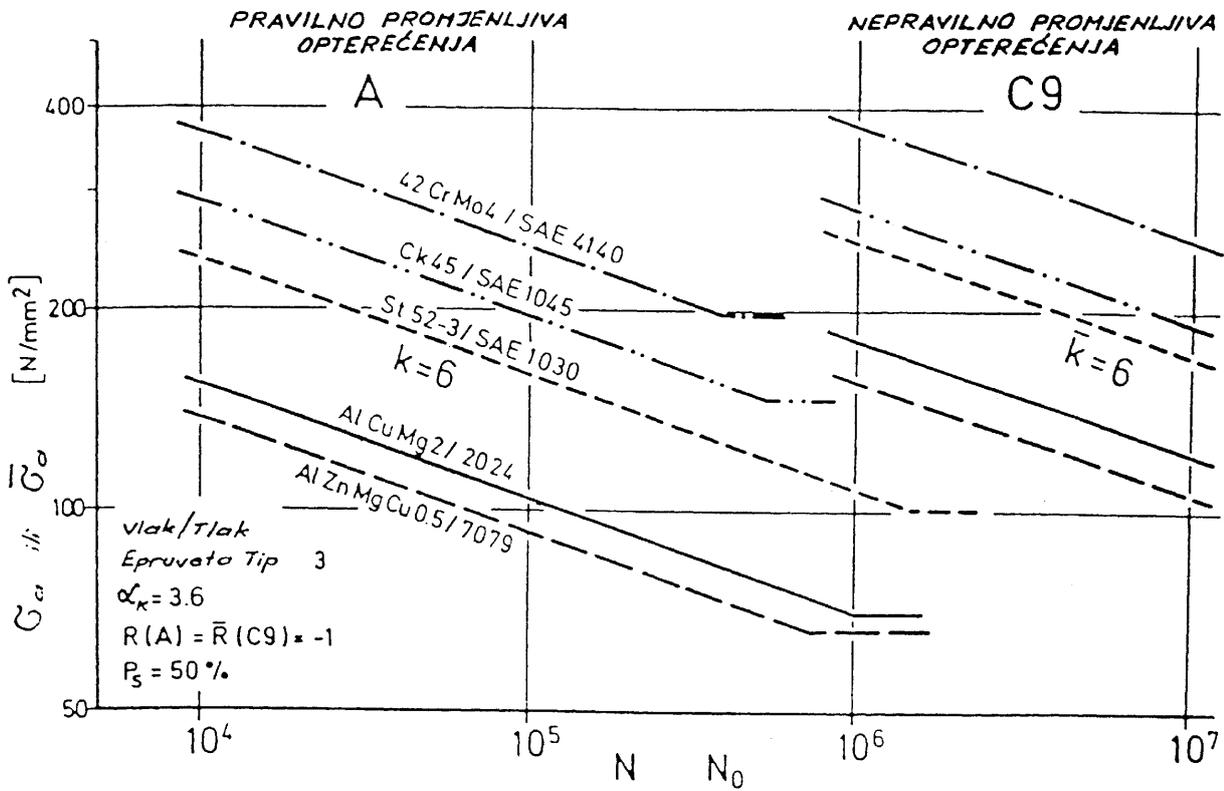
| Broj stupnja naprezanja  | Amplitudno naprezanje $N/mm^2$ | Granični broj promjena opterećenja od $2 \cdot 10^6$ |                                   | Broj epruveta na pojedinom stupnju naprezanja |               | Učestalost nastupanja manje čestog događaja ( $\sum r$ ili $\sum l$ ) |               |                 |
|--|--------------------------------|--|-----------------------------------|---|---------------|---|---------------|-----------------|
|  |                                | nije dostignut, $f_i$<br>lom o                       | je dostignut, $f_i$<br>bez loma ▲ | polomljene                                    | nepolomljene  |   |               |                 |
| $i$  | $x_i$                          |  |                                   | $r$   | $l$           | $f_i$   | $i \cdot f_i$ | $i^2 \cdot f_i$ |
| 3  | $\pm 130,5$                    | o o  |                                   | 2   | 0             | 0   | 0             | 0               |
| 2  | $\pm 127,0$                    | o ▲ o ▲ o o o o o o                                  |                                   | 8   | 2             | 2   | 4             | 8               |
| 1  | $\pm 123,5$                    | o ▲ o ▲ o ▲ o ▲ o ▲ o ▲ o ▲ o o                      |                                   | 9   | 7             | 7   | 7             | 7               |
| 0 <sup>1)</sup>  | $\pm 120,0$                    | ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲                              |                                   | 0   | 9             | 9   | 0             | 0               |
| Zbirna vrijednost  |                                |  |                                   | $\sum r = 19$                                 | $\sum l = 16$ | $F = 18$  | $A = 11$      | $B = 15$        |
| <sup>1)</sup> Na najnižem nivou nema loma epruveta pa se taj nivo označava s nulom   |                                |  |                                   |   |               |   |               |                 |
| Srednja vrijednost $m = x_{(i=0)} \cdot d \cdot \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2}\right) = 123,9 \text{ N/mm}^2$ . Predznak minus za $\sum r$ (polomlj.); Predznak plus za $\sum l$ (ne polomlj.)<br>Rastojanje stupnjeva $d = 3,5 \text{ N/mm}^2$                         |                                |  |                                   |   |               |   |               |                 |
| Standardno odstupanje $s = 1,62 \cdot d \cdot \left(\frac{F \cdot B - A^2}{F^2} + 0,029\right) = 2,77 \text{ N/mm}^2$<br>Provjera ispunjenja uvjeta za valjanost izraza za $s$ : $\frac{F \cdot B - A^2}{F^2}$ mora biti $> 0,30$ ( $\frac{F \cdot B - A^2}{F^2} = 0,46$ ) |                                |  |                                   |   |               |   |               |                 |
| Vjerovatnost preživljavanja $P_{\bar{U}} = 90\% \hat{=} m - s \cdot 1,28 = 120,4 \text{ N/mm}^2$ , $P_U = 10\% \hat{=} m + s \cdot 1,28 = 127,4 \text{ N/mm}^2$  |                                |  |                                   |   |               |   |               |                 |

Pretpostavke za promjenljivost postupka stepenica :

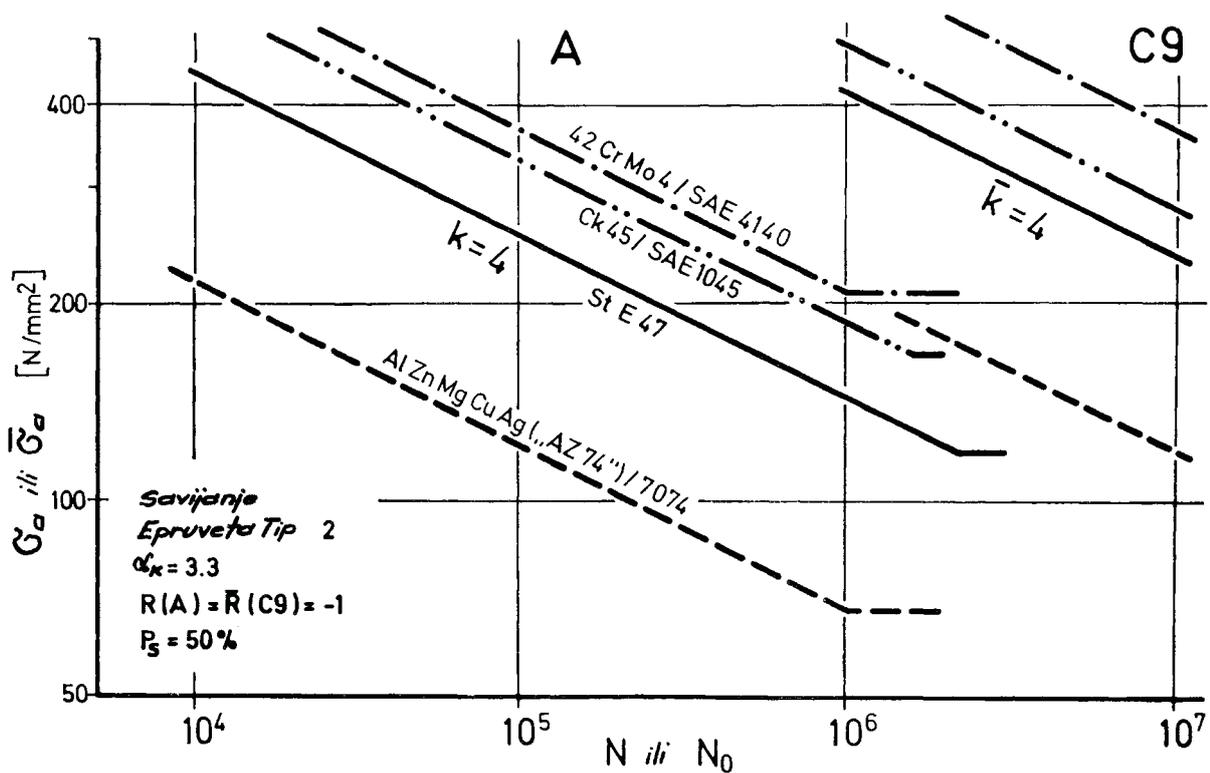
1. Razmatrana varijabla pokorava se normalnoj razdiobi
2. Broj epruveta mora biti dovoljno velik, po moćnosti preko 40
3. Rastojanje stupnjeva treba biti manje od dvostrukog standardnog odstupanja

Slika 3.10 Statistička obrada rezultata mjerenja – trajna dinamička čvrstoća.

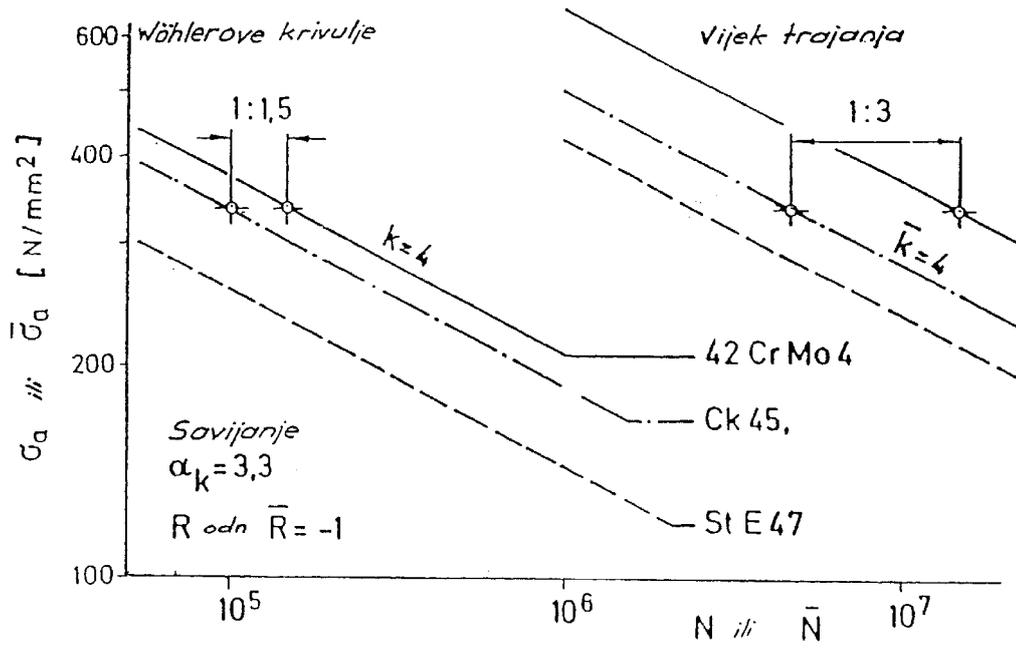
3.2 Utjecaji na pogonsku čvrstoću materijala.



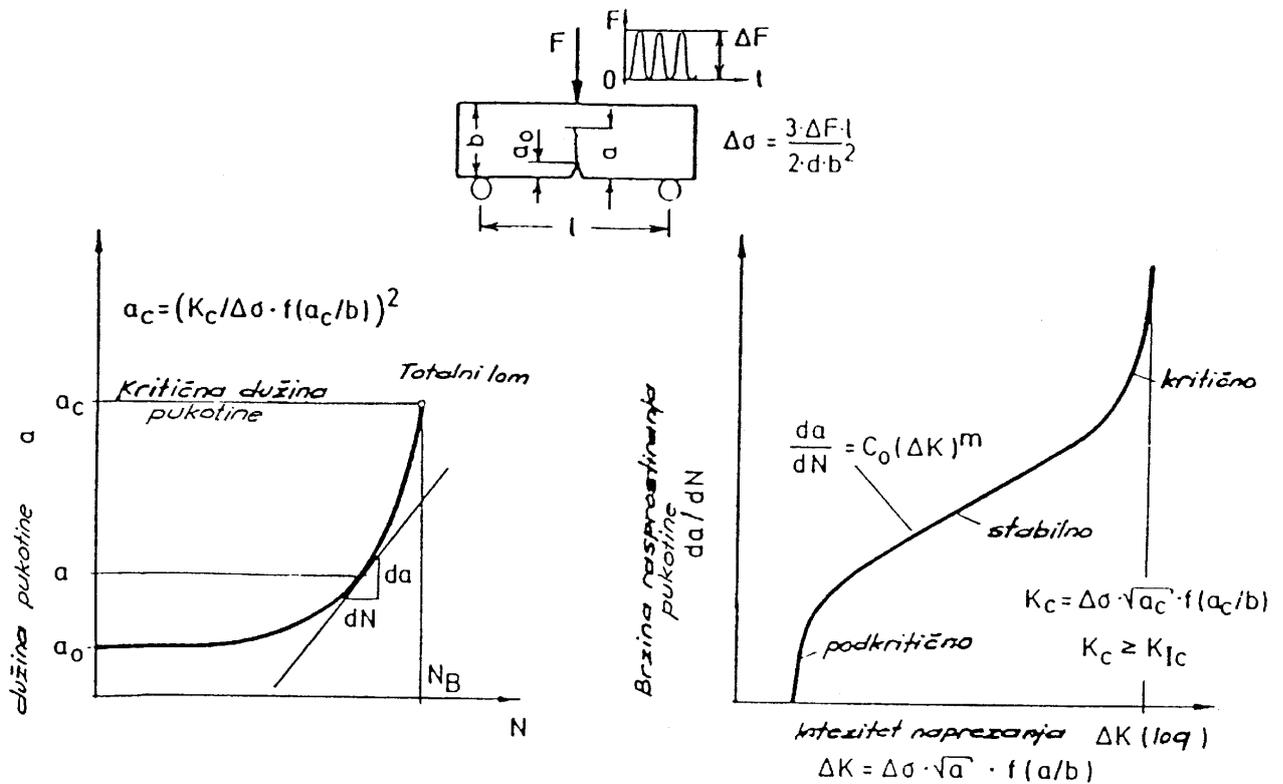
Slika 3.11 Čvrstoće različitih materijala (vlak - tlak).



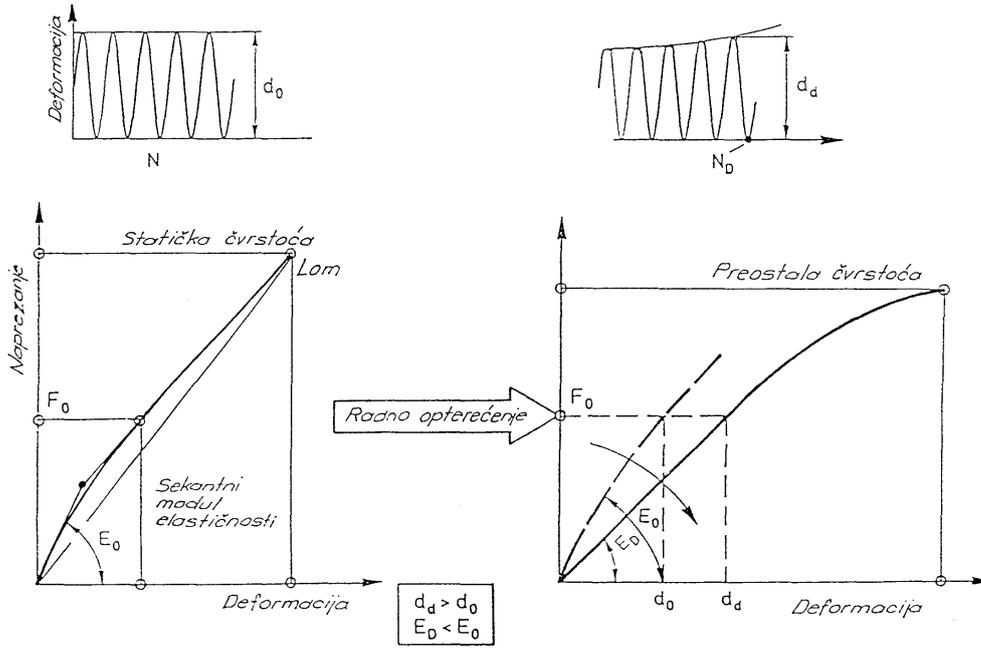
Slika 3.12 Čvrstoće različitih materijala (savijanje).



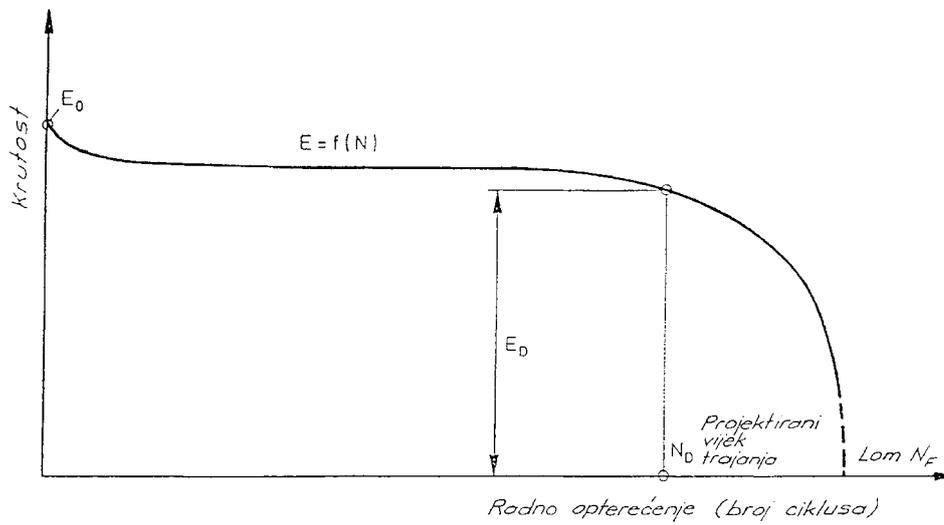
Slika 3.13 Poredba čvrstoća pri pravilno promjenljivim opterećenjima.



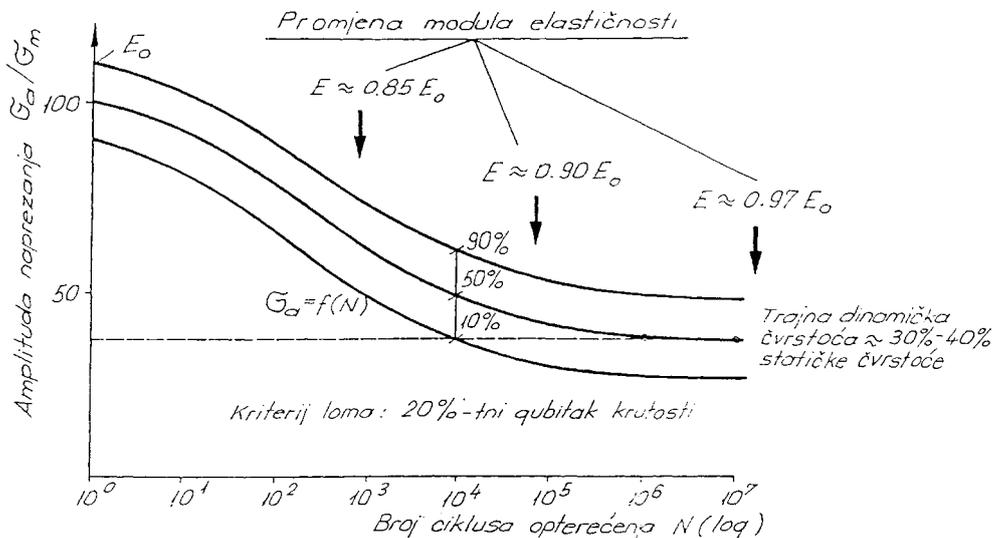
Slika 3.14 Mehanika loma.



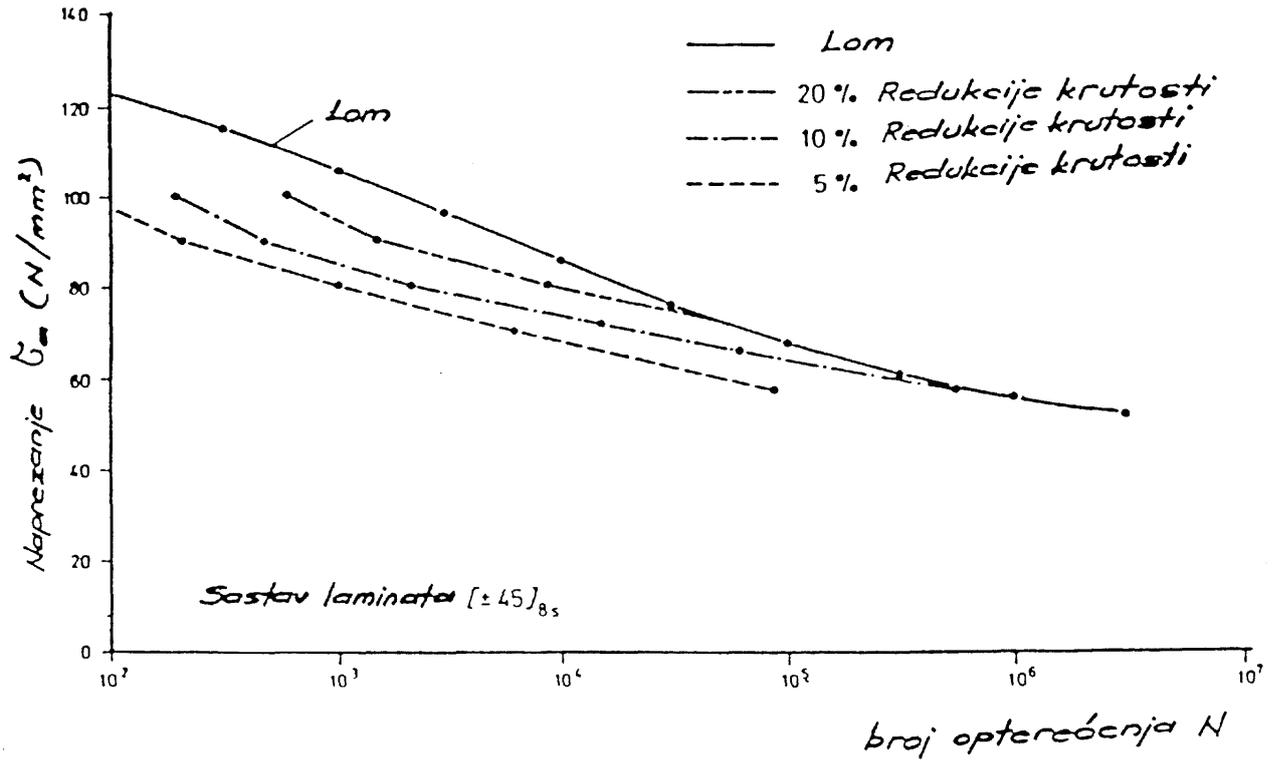
Slika 3.15 Deformacije kod radnog opterećenja.



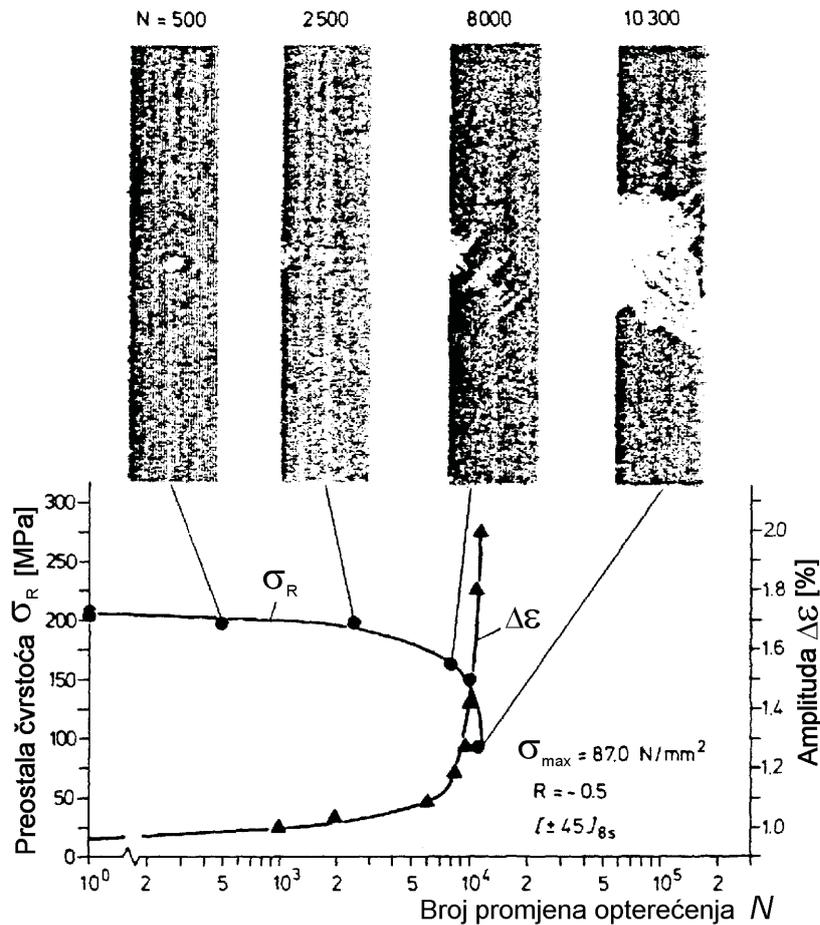
Slika 3.16 Promjena krutosti uslijed radnog opterećenja.



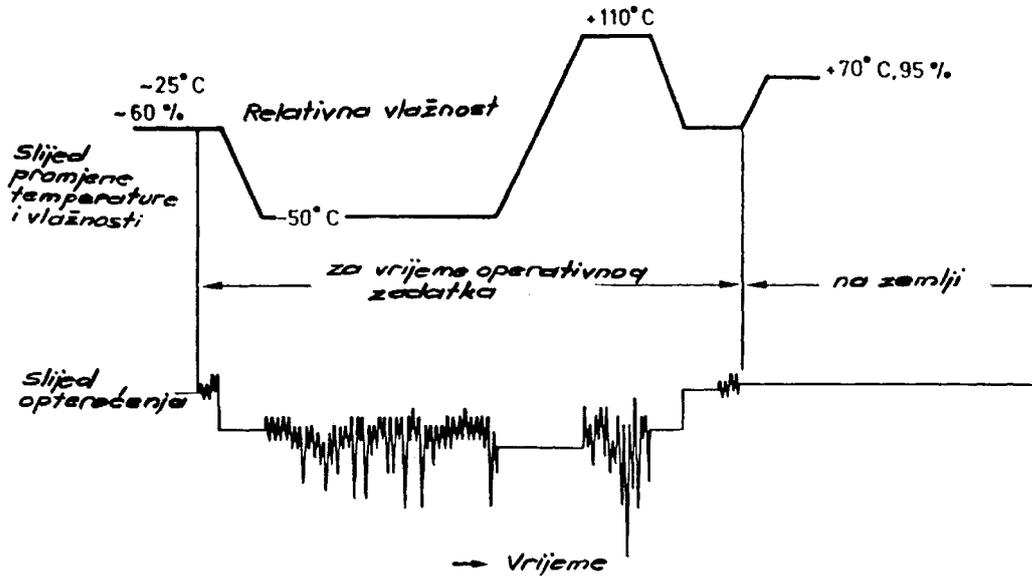
Slika 3.17 Zamorna čvrstoća kompozita u odnosu na statičku čvrstoću.



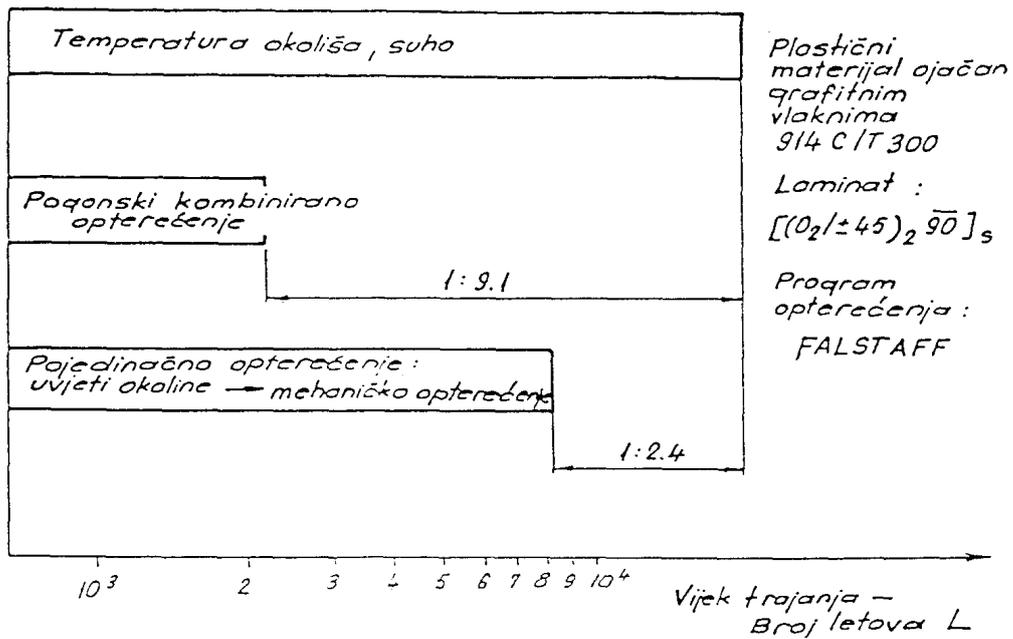
Slika 3.18 Krivulja vijeka trajanja za različite promjene krutosti.



Slika 3.19 Promjena statičke čvrstoće materijala ovisno o promjeni krutosti.

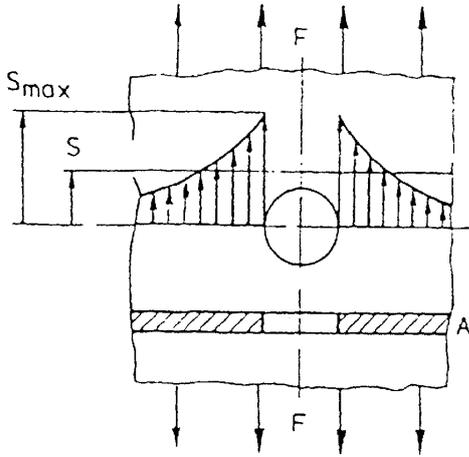


Slika 3.20 Tipični slijed opterećenja za gornju površinu avionskog krila.



Slika 3.21 Upliv kombiniranog opterećenja gornje površine avionskog krila.

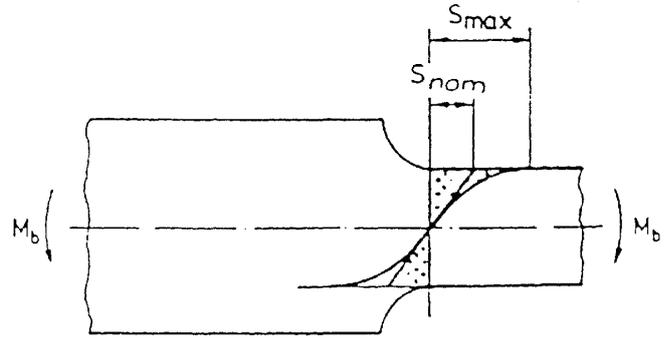
a) *Provrt u aksijalno napretnutom štapu*



Nominalno napreznanje

$$S_{nom} = \frac{F}{A}$$

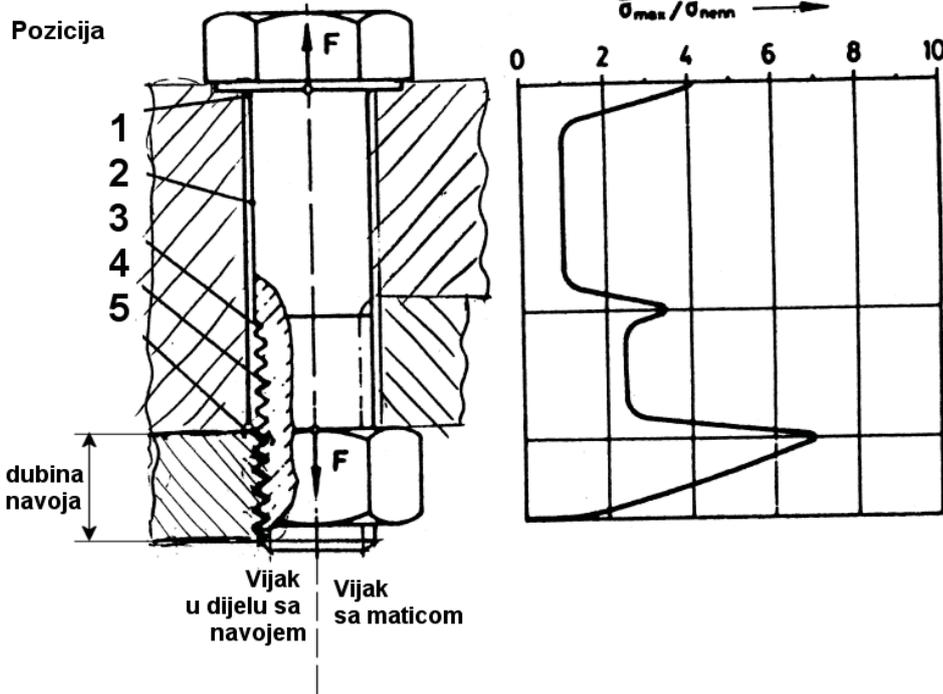
b) *Savijanje na promjenljivoj presjeku*



$$S_{nom} = \frac{M_b}{W_b}$$

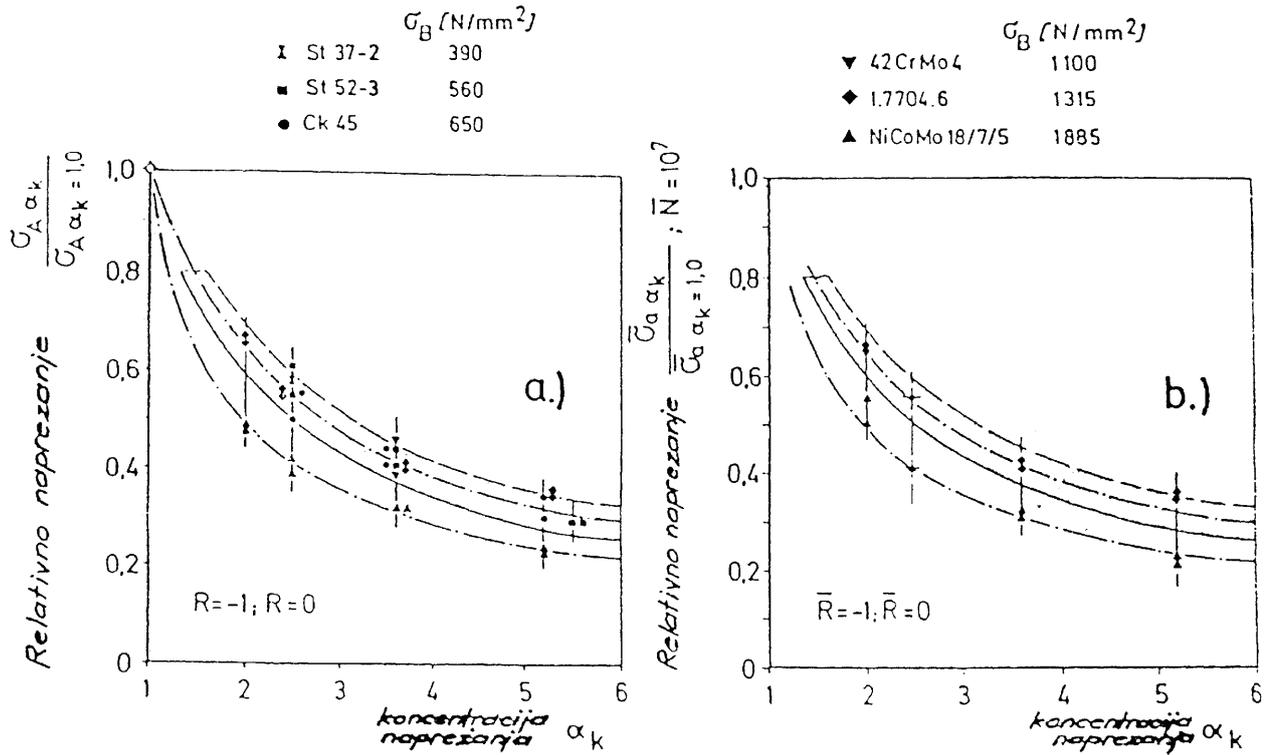
Faktor oslika  $\alpha_k = \frac{S_{max}}{S}$

Slika 3.22 Koncentracija napreznanja.

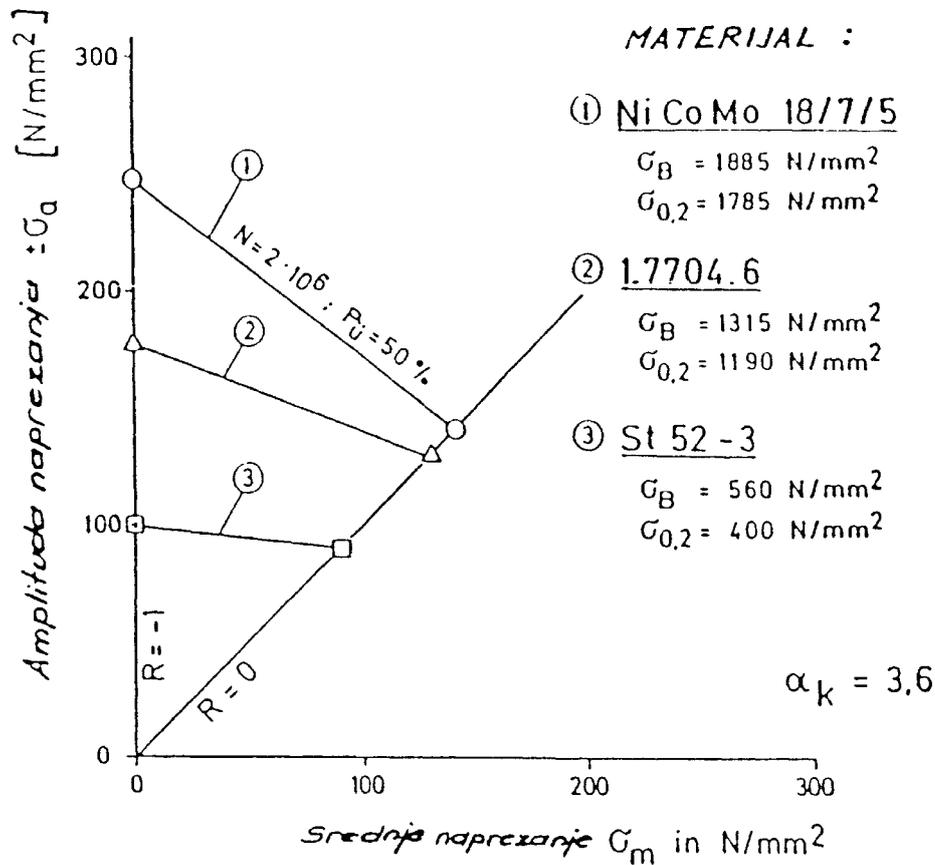


| Pozicija   | 1       | 2         | 3     | 4         | 5       |
|------------|---------|-----------|-------|-----------|---------|
| $\alpha_k$ | 3 ÷ 5   | ≈ 1       | 3 ÷ 4 | 2 ÷ 3     | 4 ÷ 10  |
| $\beta_k$  | 2 bis 4 | 1 bis 1,1 | ≈ 2   | 1,5 bis 2 | 5 bis 8 |

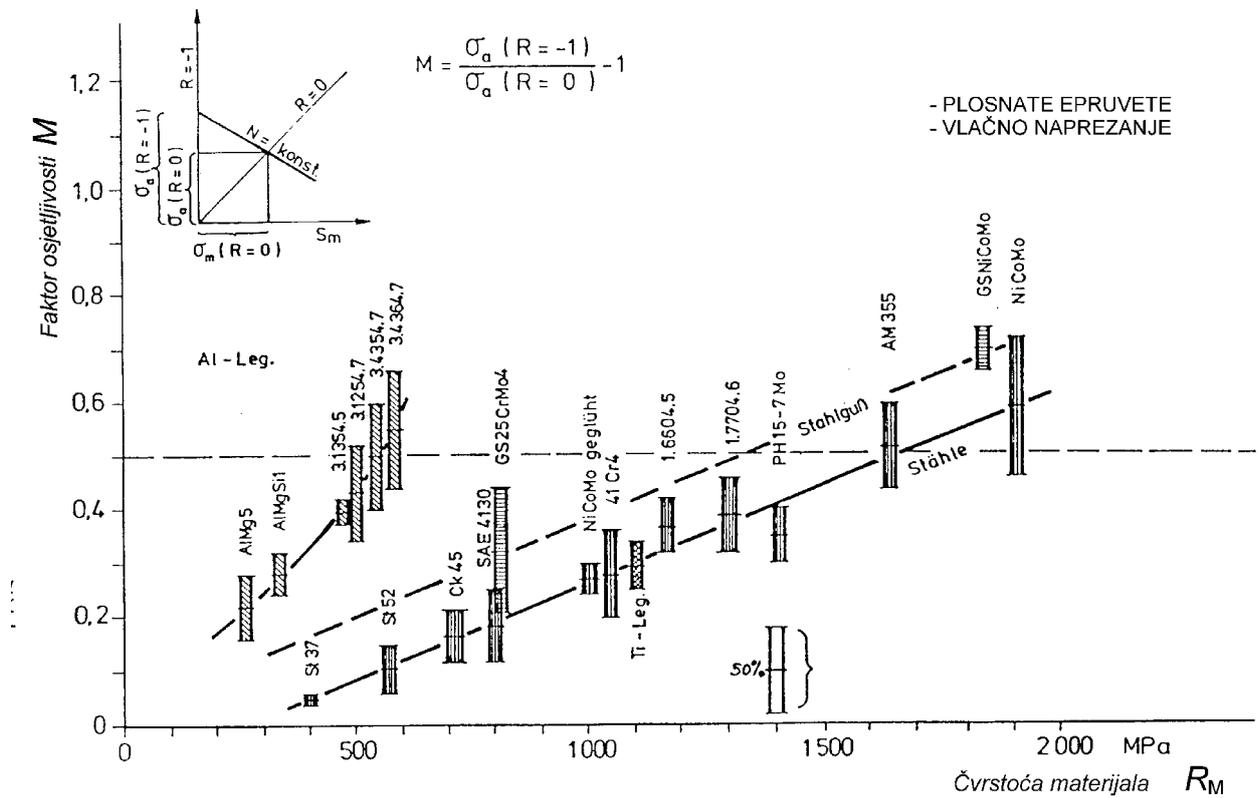
Slika 3.23 Faktor koncentracije napreznanja  $\alpha_k$  i utjecaja konc. napreznanja  $\beta_k$ .



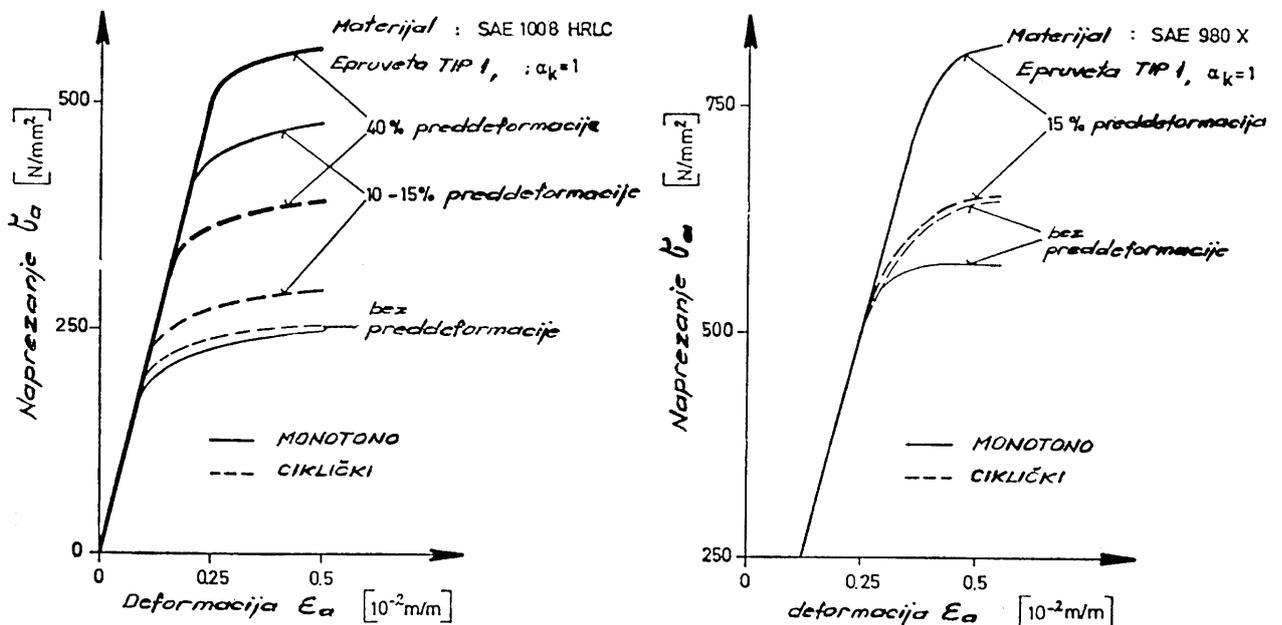
Slika 3.24 Ovisnost čvrstoće o koncentraciji naprezanja.



Slika 3.25 Upliv srednjeg naprezanja kod različitih čelika.



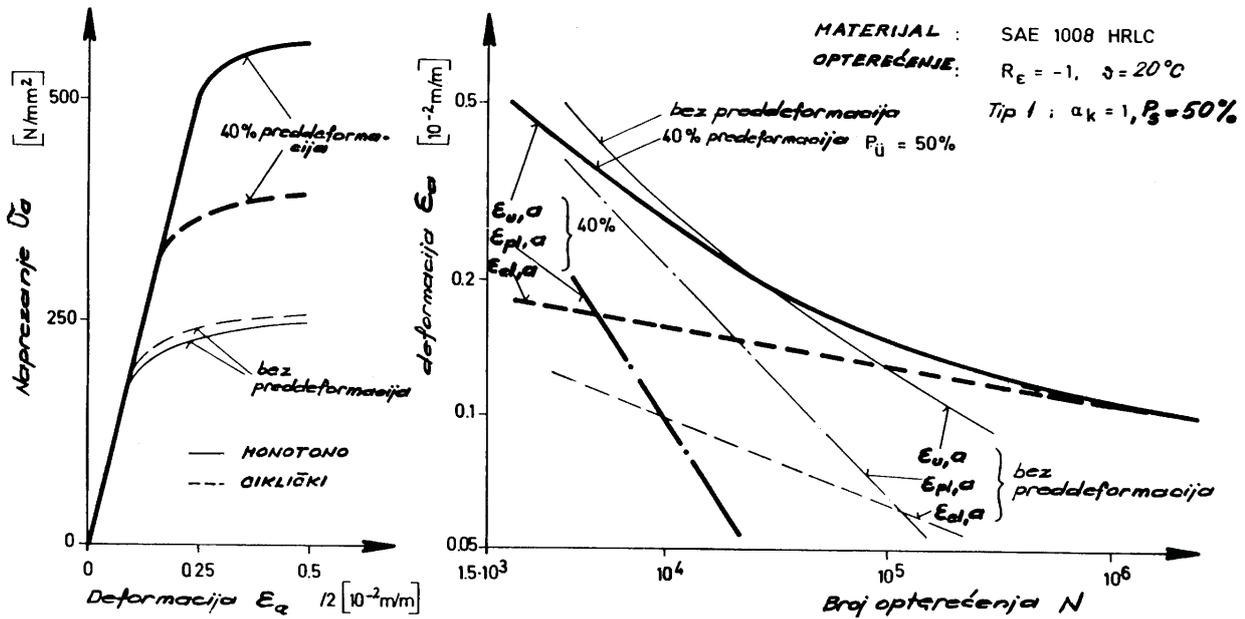
Slika 3.26 Osjetljivost materijala na razinu srednjeg naprezanja.



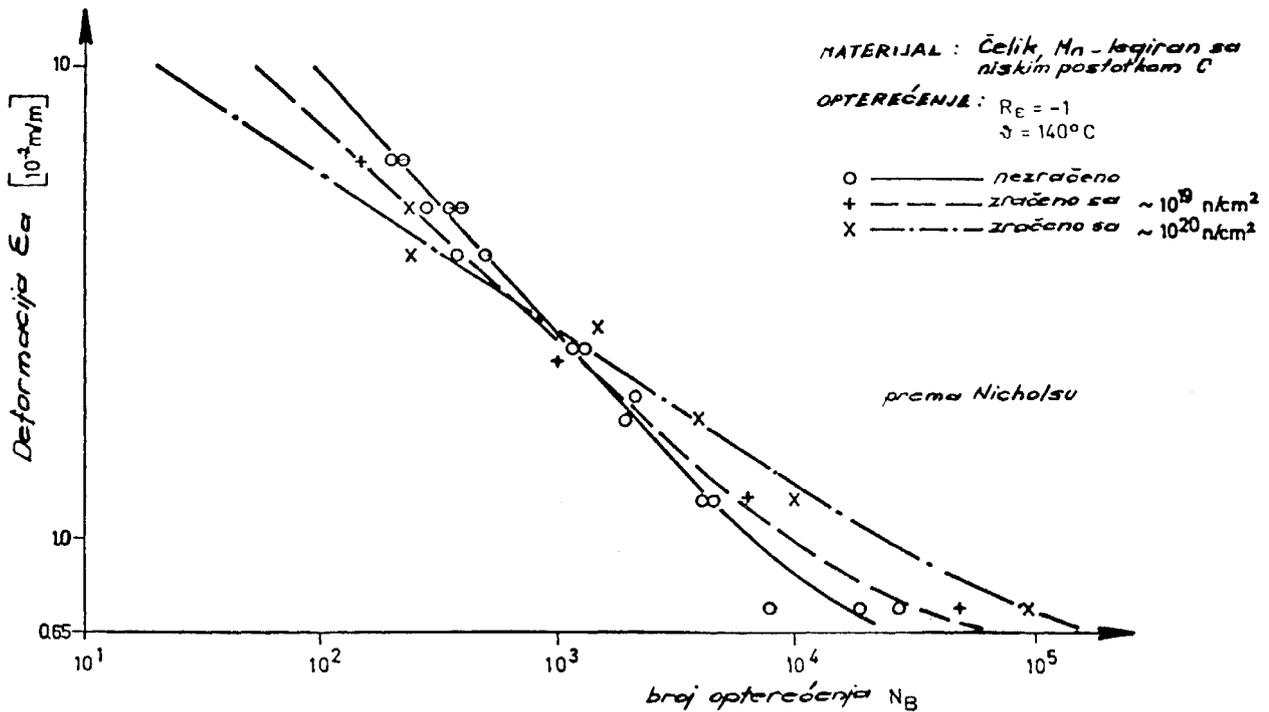
prema Parker i Montgomery

prema Sherman i Landgraf

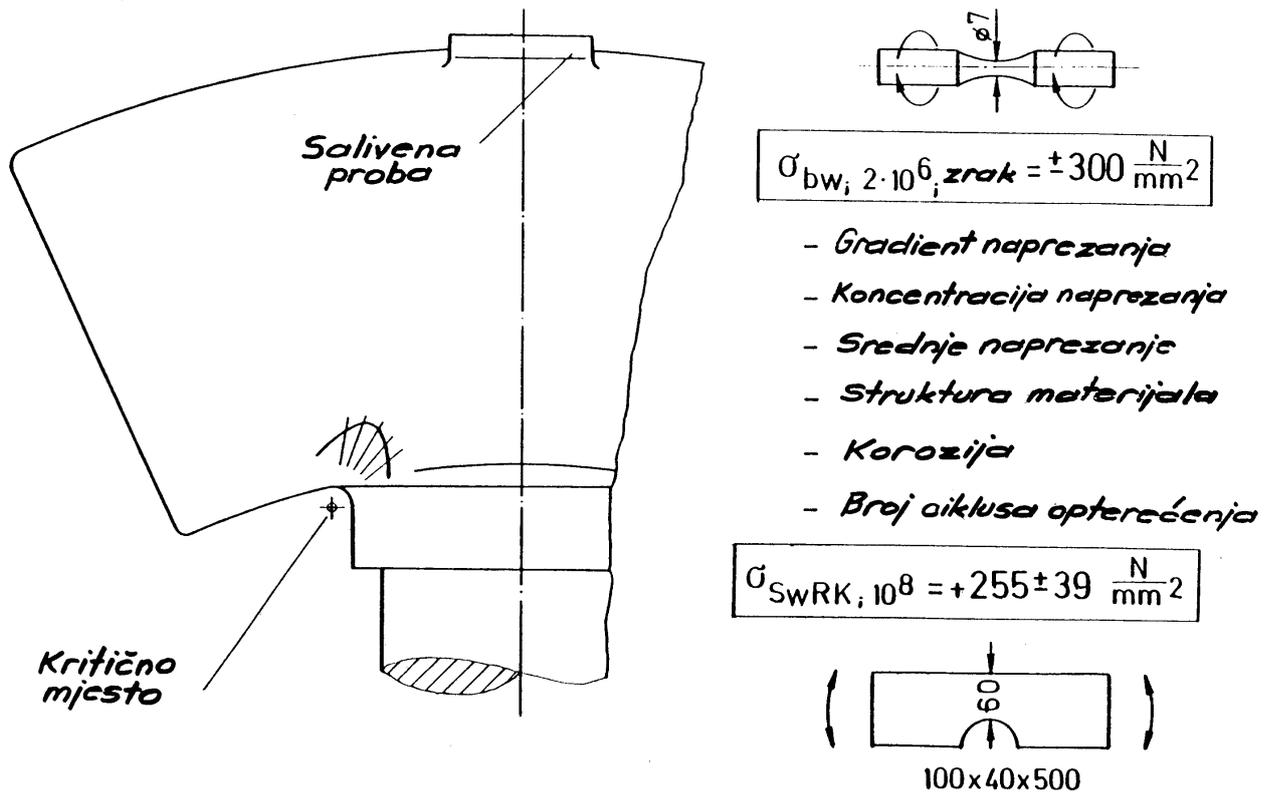
Slika 3.27 Upliv hladne predeformacije na odnos naprezanje-deformacija kod različitih čelika.



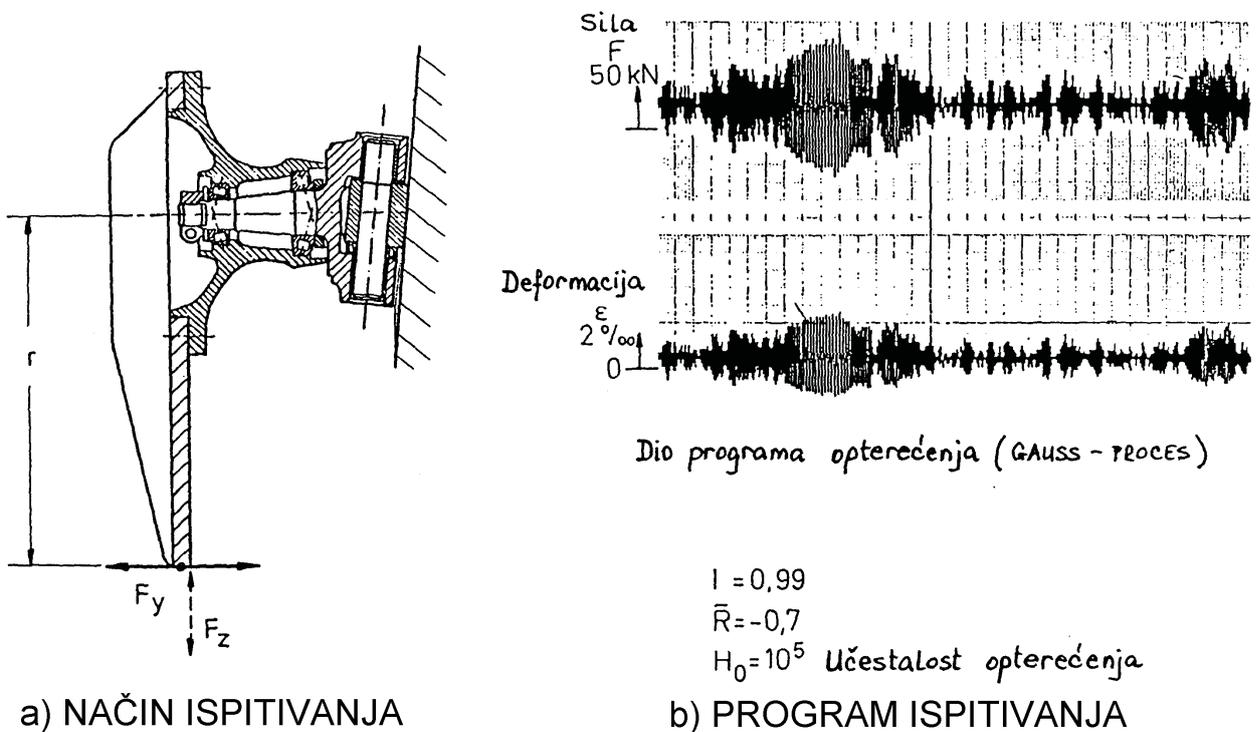
Slika 3.28 Upliv predeformacije na vijek trajanja.



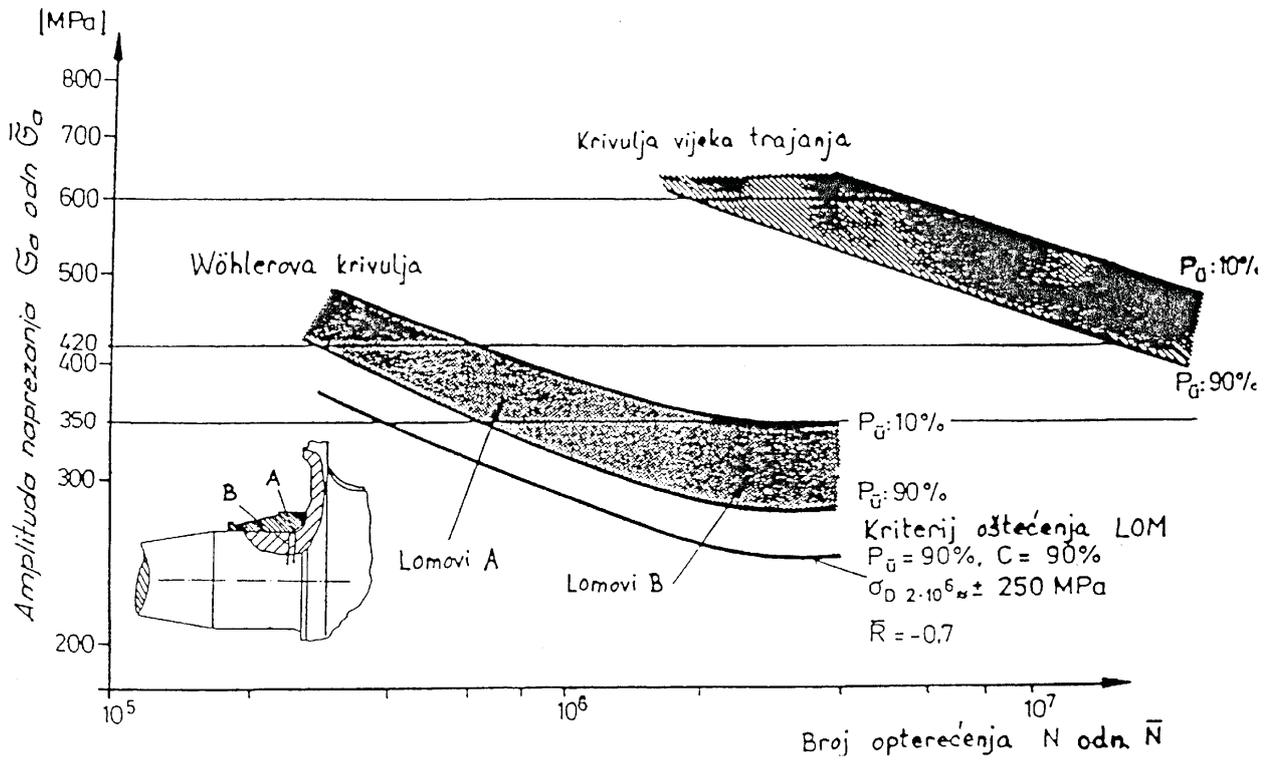
Slika 3.29 Upliv nuklearnog zračenja na čvrstoću.



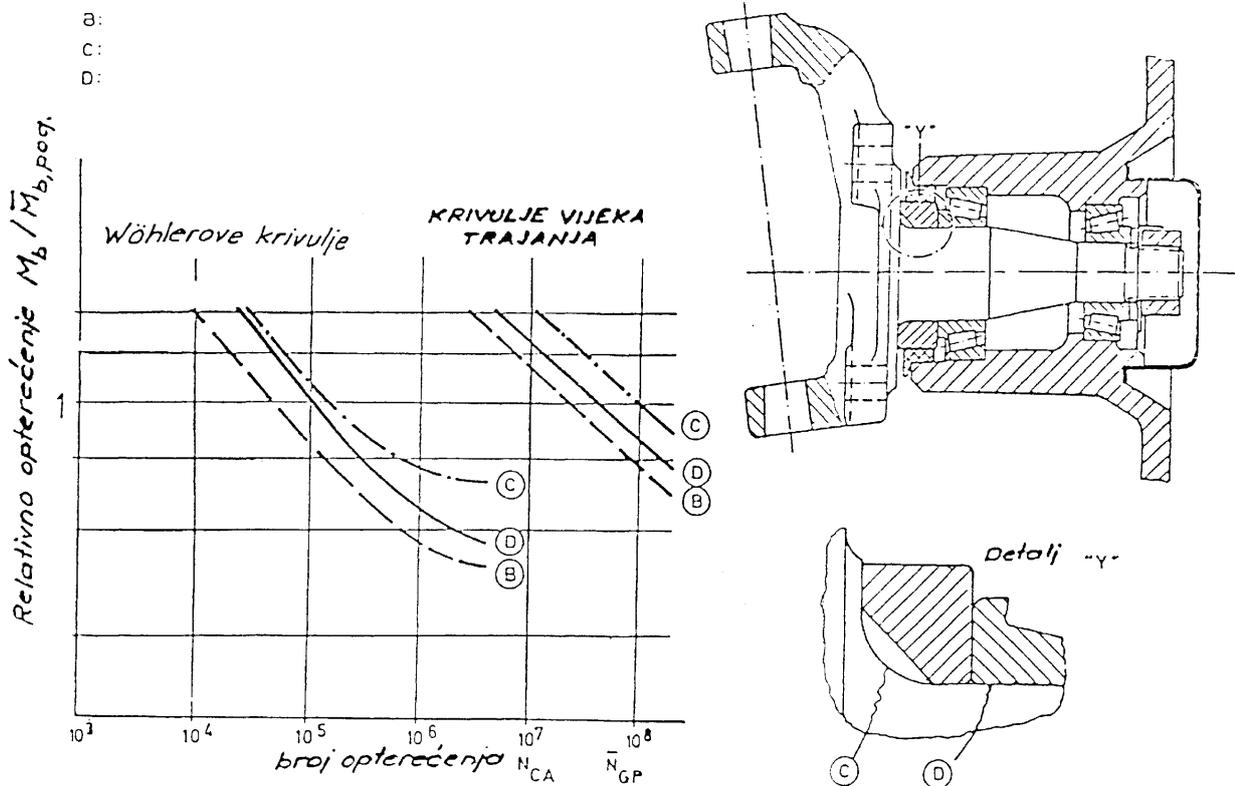
Slika 3.30 Čvrstoća čeličnog lijeva G-X CrNi134 Kaplanove lopatice ( $\sigma_M > 750 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{0.2} > 600 \text{ MPa}$ ).



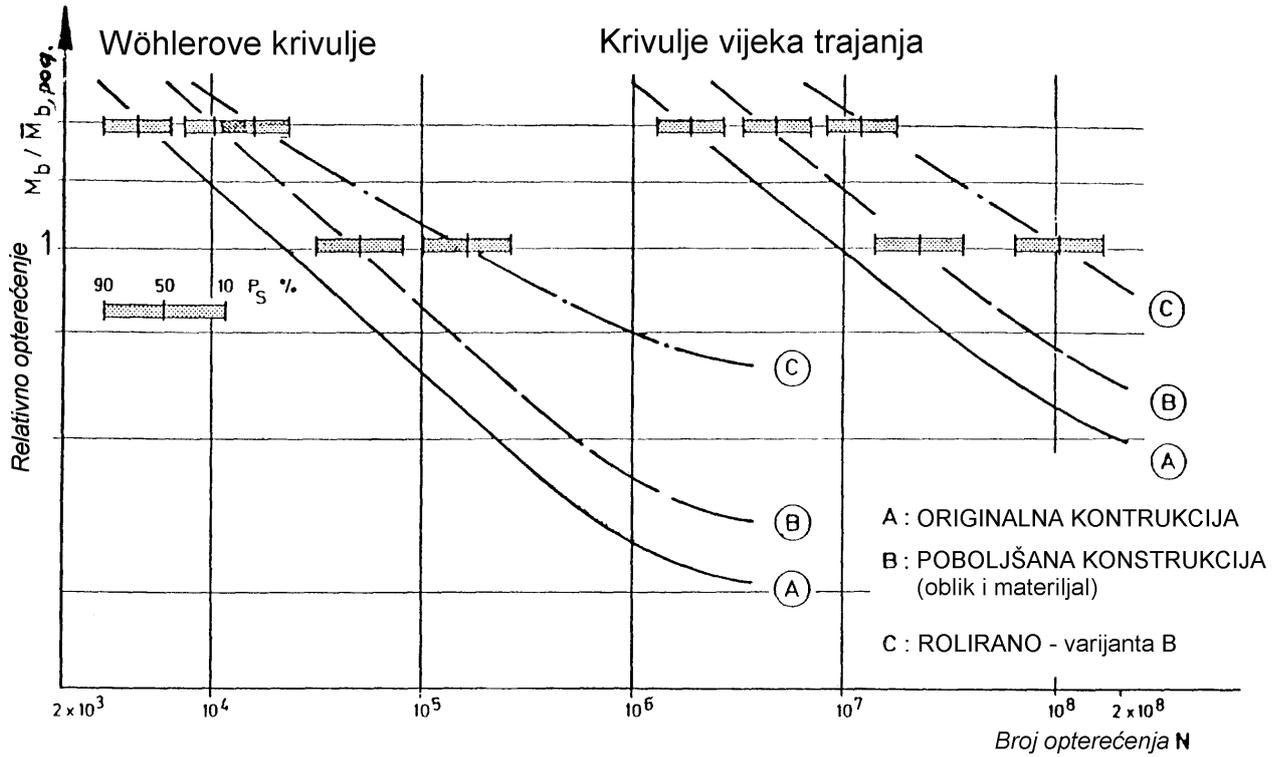
Slika 3.31 Način i program ispitivanja za određivanje podnošljivog opterećenja u pojedinim područjima automobilske industrije.



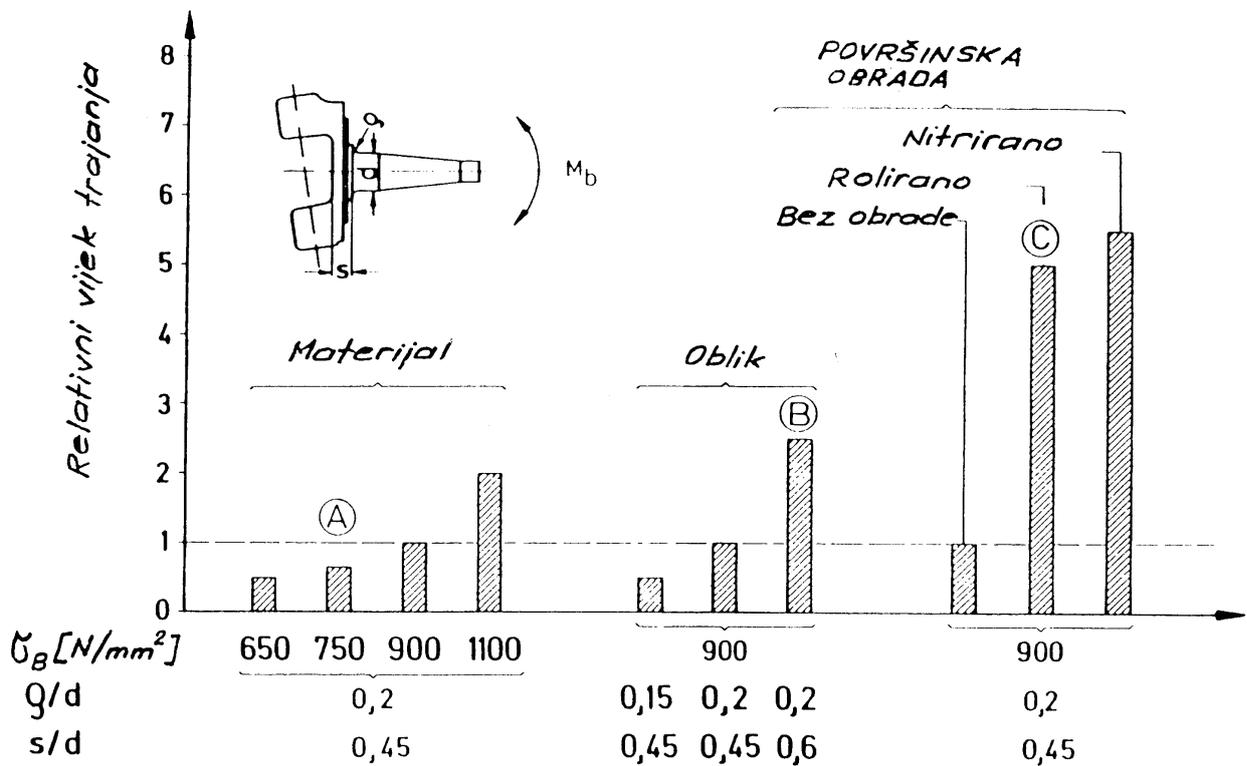
Slika 3.32 Čvrstoća osovine kotača pri promjenljivom opterećenju.



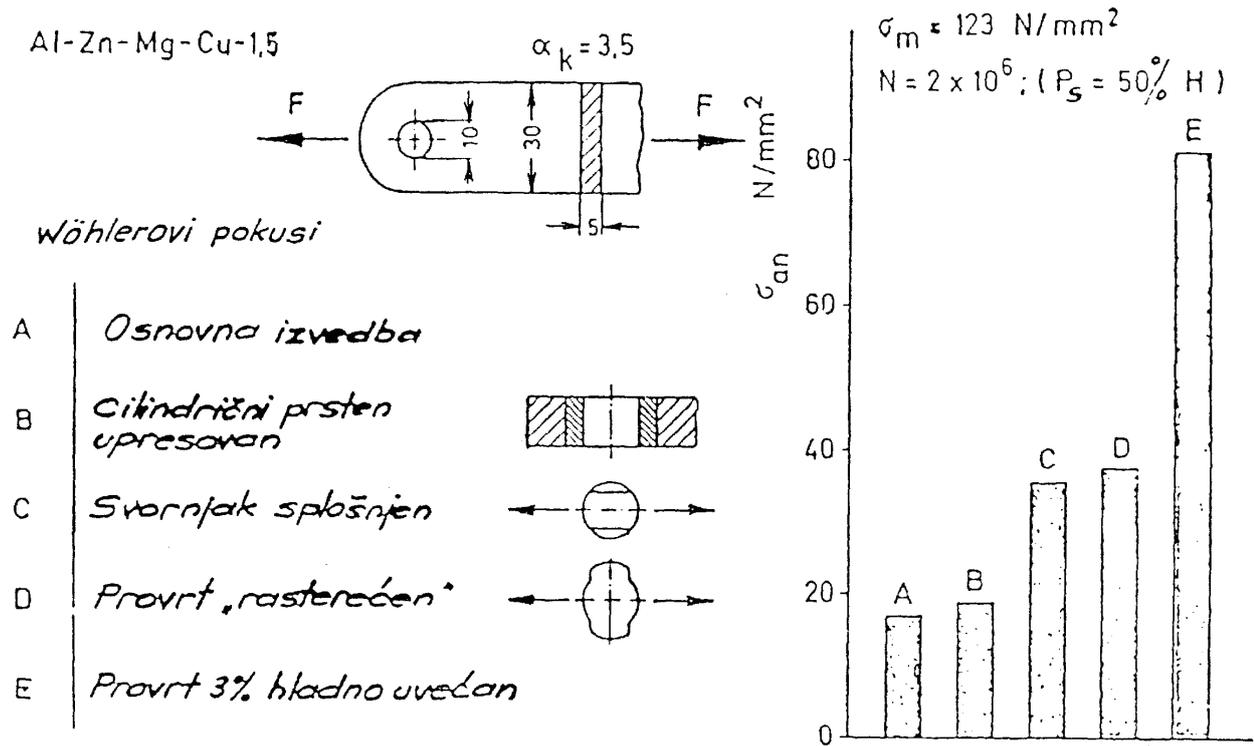
Slika 3.33 Čvrstoća osovine kotača ovisno o uvjetima ispitivanja.



Slika 3.34 Poredba čvrstoće za pojedine izvedbe osovine kotača.



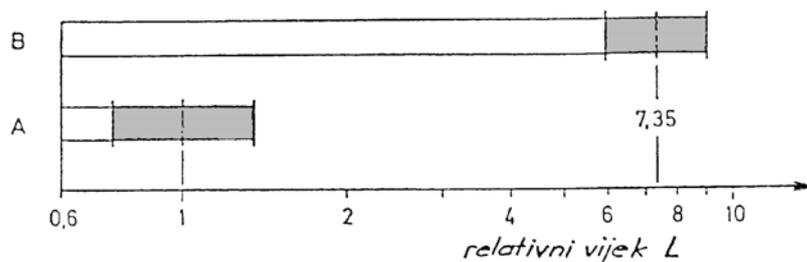
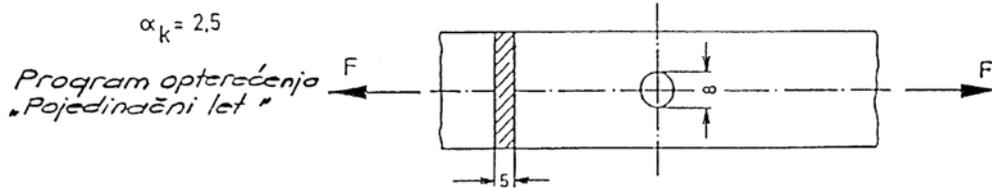
Slika 3.35 Upliv materijala, konstrukcijske i tehnološke obrade na vijek trajanja.



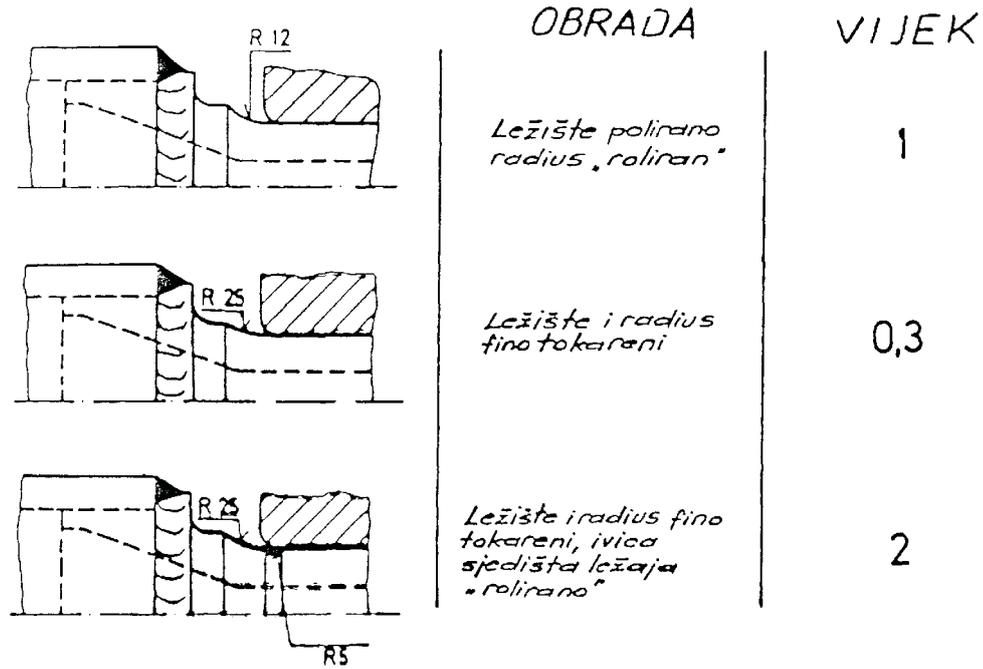
Slika 3.36 Optimiranje čvrstoće pri koroziji na trenje.

Al-Cu-Mg 2

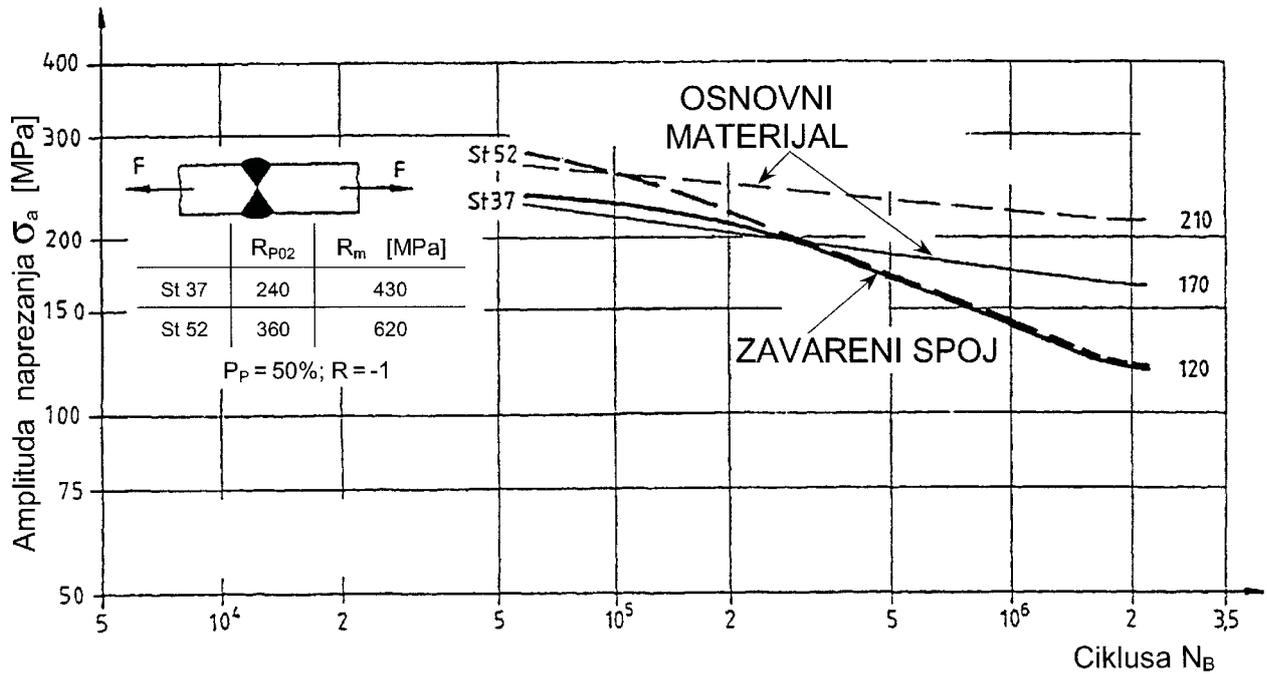
A: polirano B: deformirano 3,24%



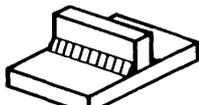
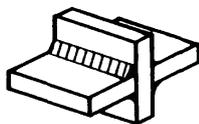
Slika 3.37 Povećanje vijeka trajanja utora.



Slika 3.38 Upliv obrade i konstrukcijskog rješenja na vijek trajanja.

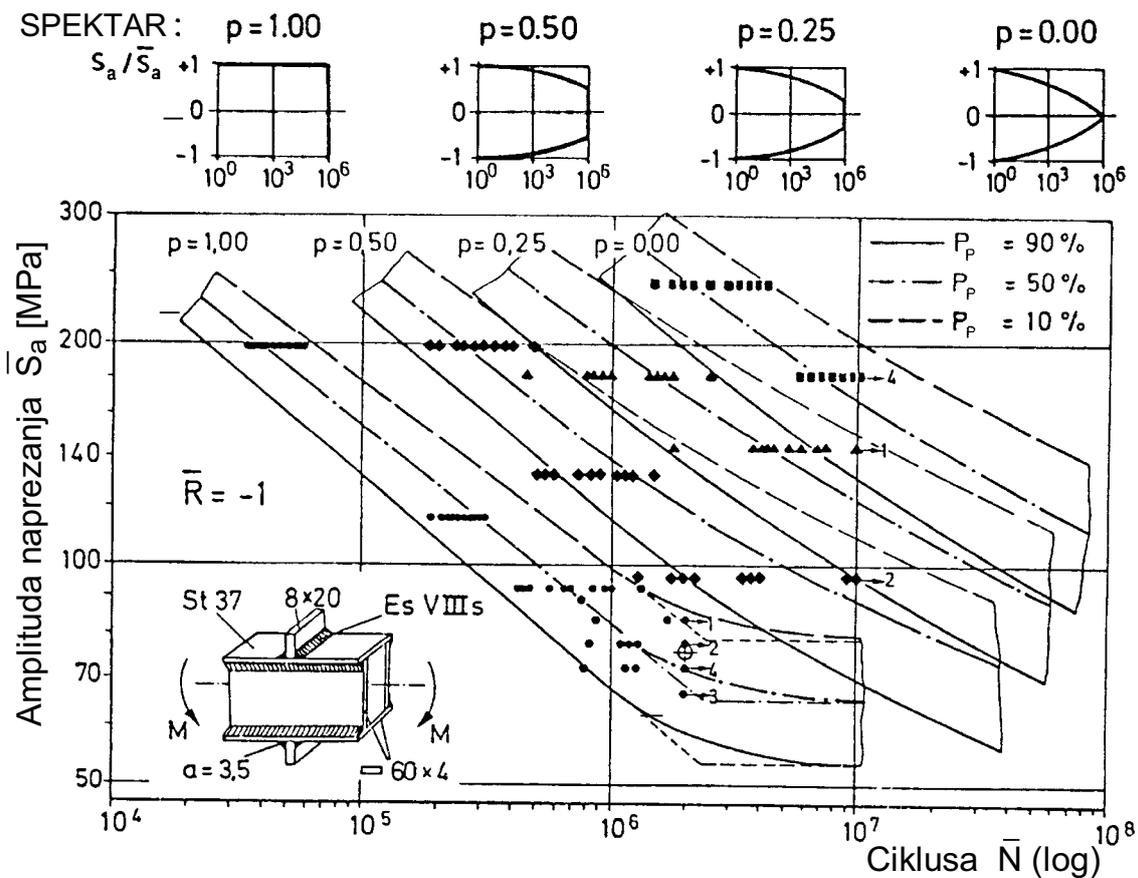


Slika 3.39 Wöhlerove krivulje za osnovni materijal i za zavar.

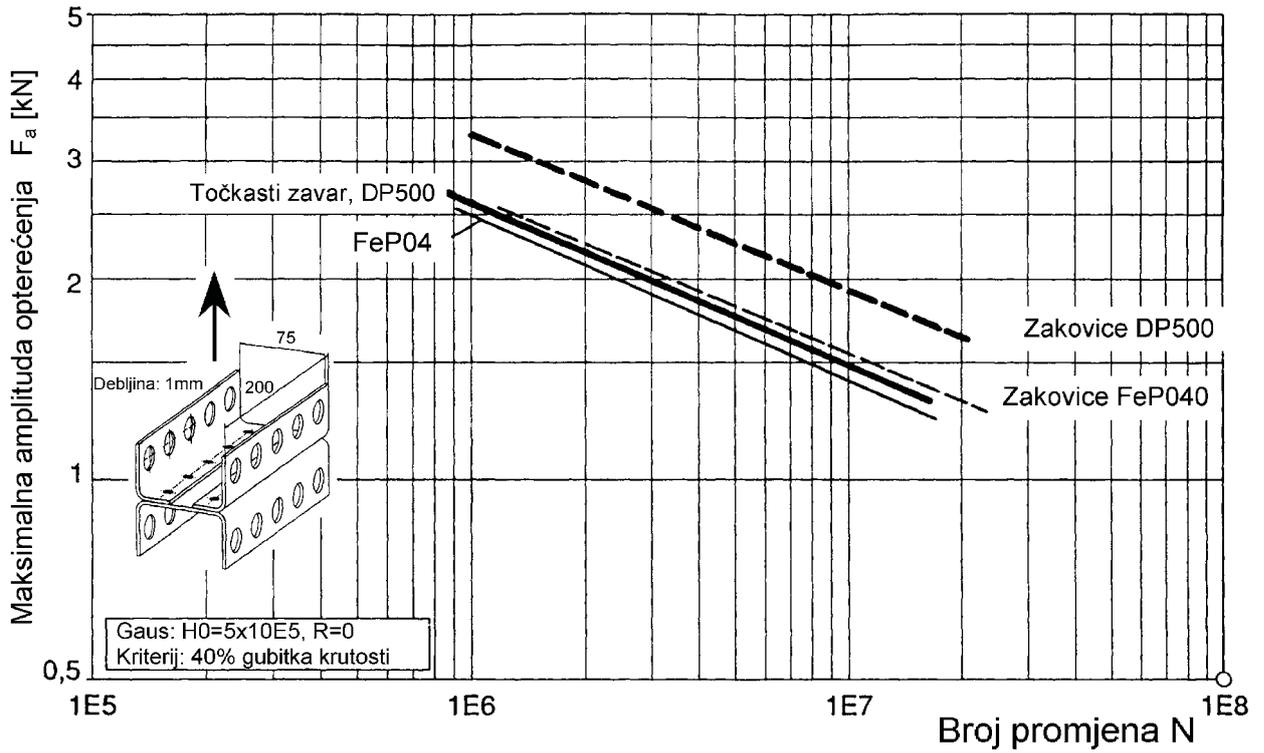
| Oblik<br>prema DIN 15018  | Trajna titrajna čvrstoća $\sigma_{A,50\%}$ [MPa] <sup>☆</sup> |       |
|---|---|-------|
|   | R = -1  | R = 0 |
| K 1  | 122   | 102   |
| K 3  | 73  | 61    |
| K 4  | 44  | 37    |

Za konstrukcijske čelike kao što su: St 37, St E 36, St E 47 i St E 70

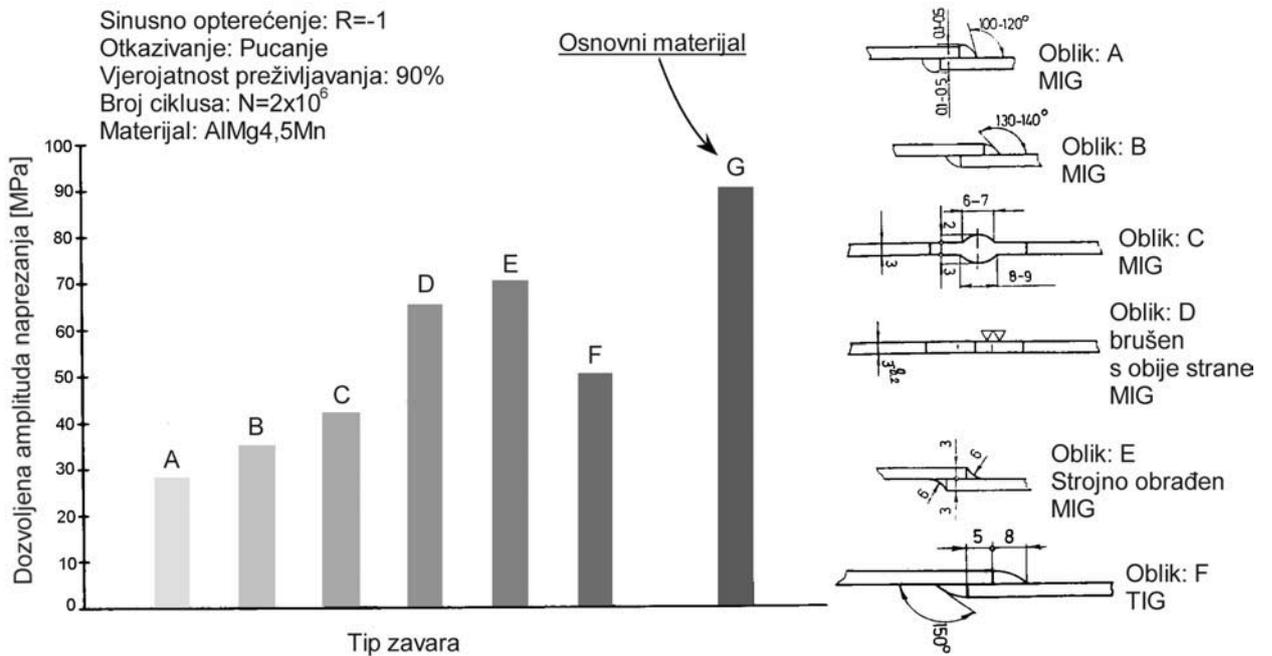
Slika 3.40 Pogonska čvrstoća tipičnih zavarenih spojeva od konstrukcijskih čelika.



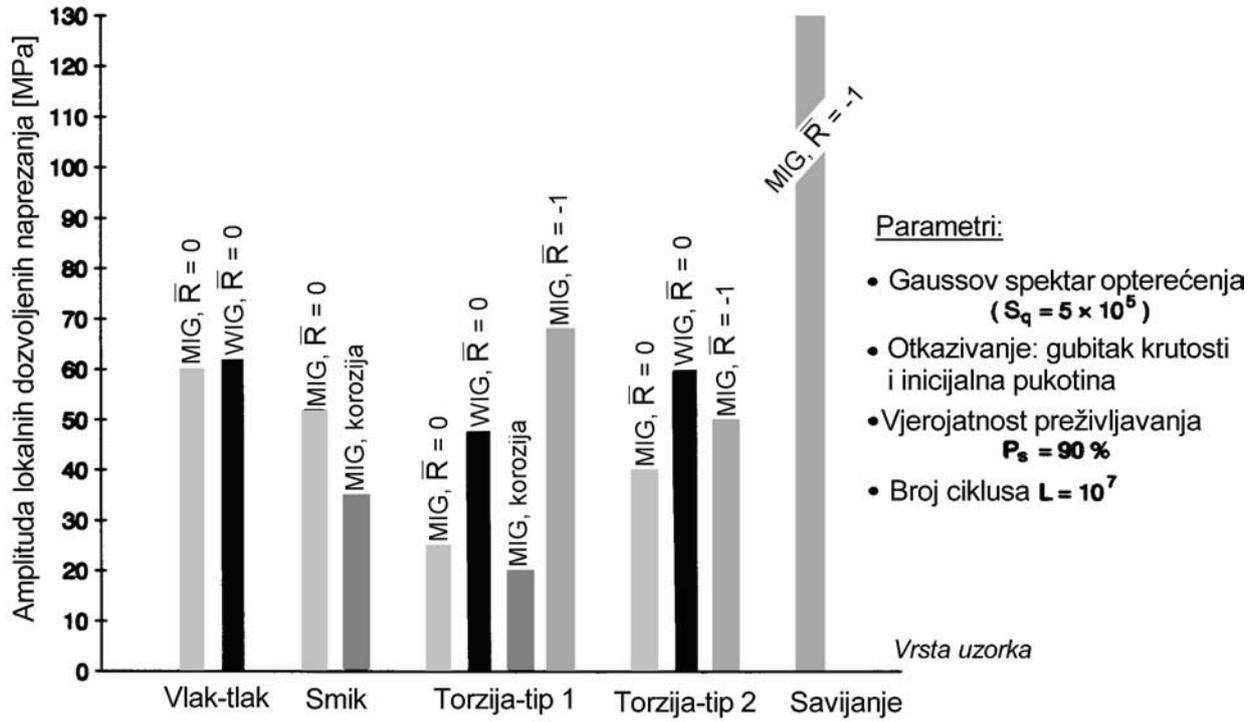
Slika 3.41 Rezultati ispitivanja na zavarenome spoju i izračunate vrijednosti prema Modificiranom Mineru.



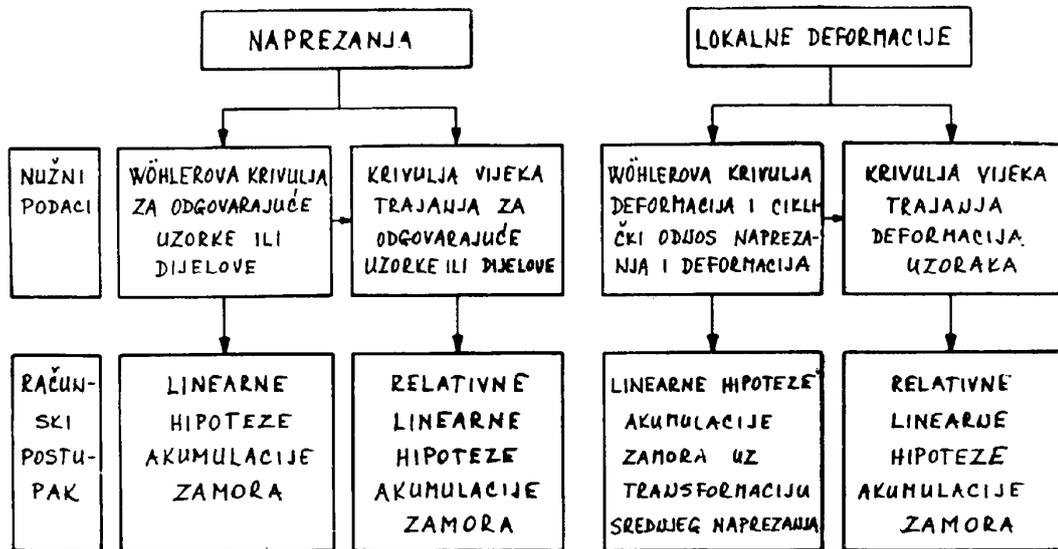
Slika 3.42 Rezultati ispitivanja s promjenjivom amplitudom naprezanja točkasto zavarenih i zakovanih uzoraka.



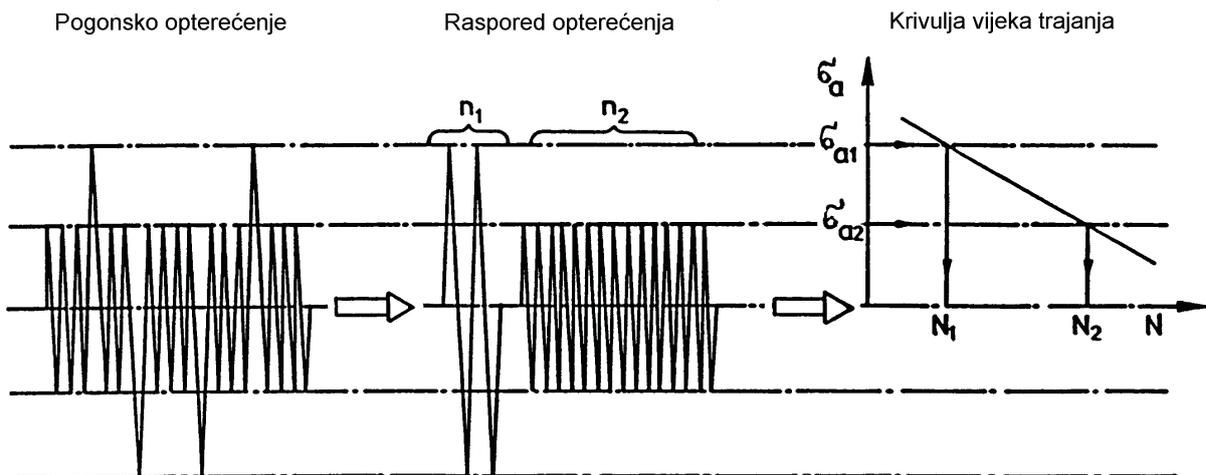
Slika 3.43 Dozvoljena naprezanja kod  $2 \times 10^6$  opterećenja konstantne amplitude savijanjem.

Slika 3.44 Dozvoljena naprezanja kod  $1 \times 10^7$  ciklusa.

## 4. Metode procjene vijeka trajanja.

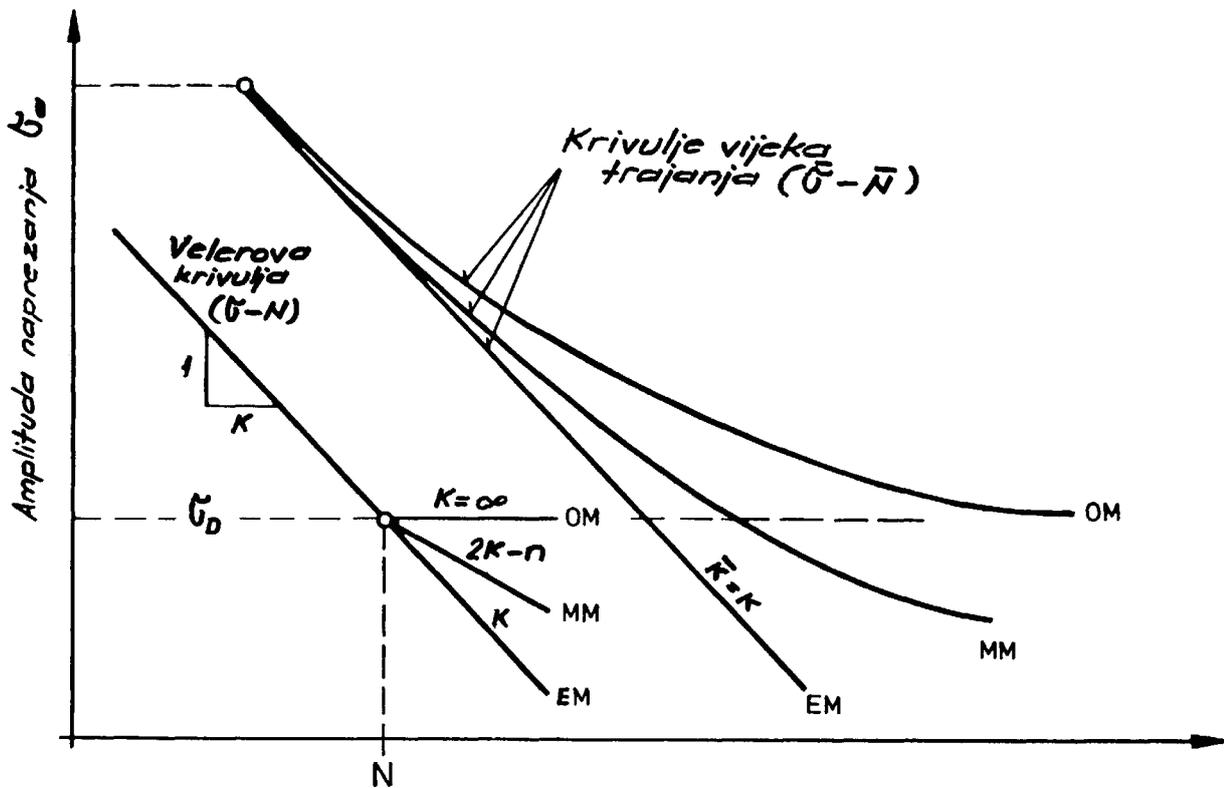
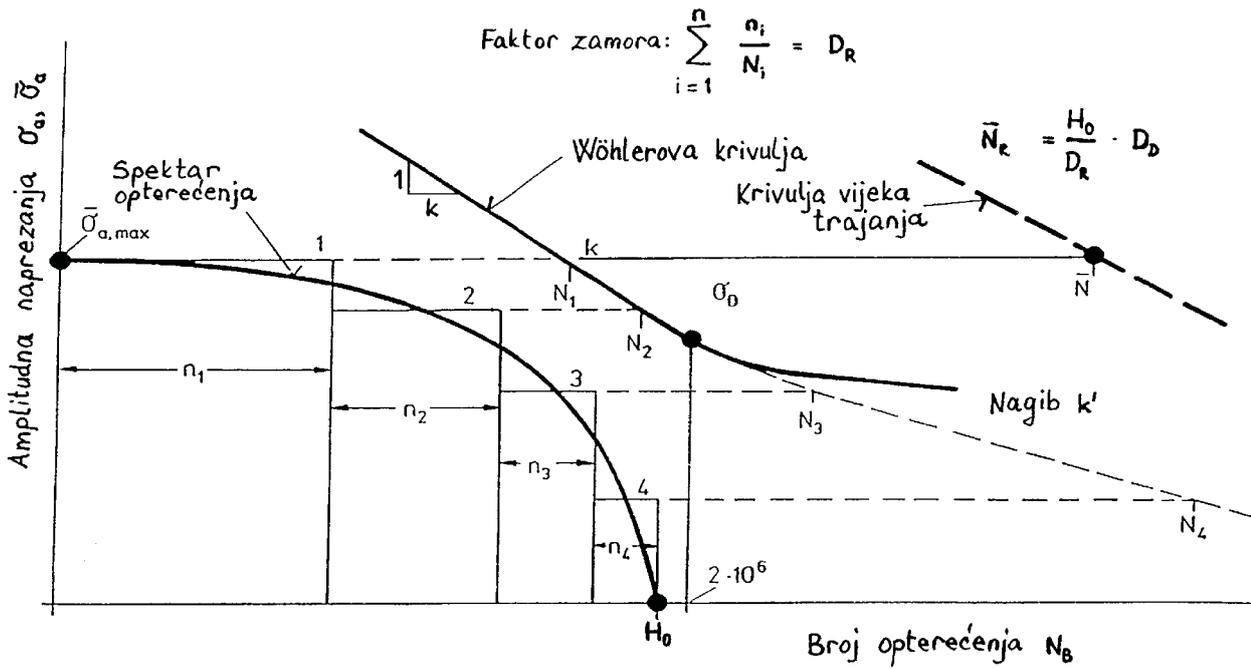


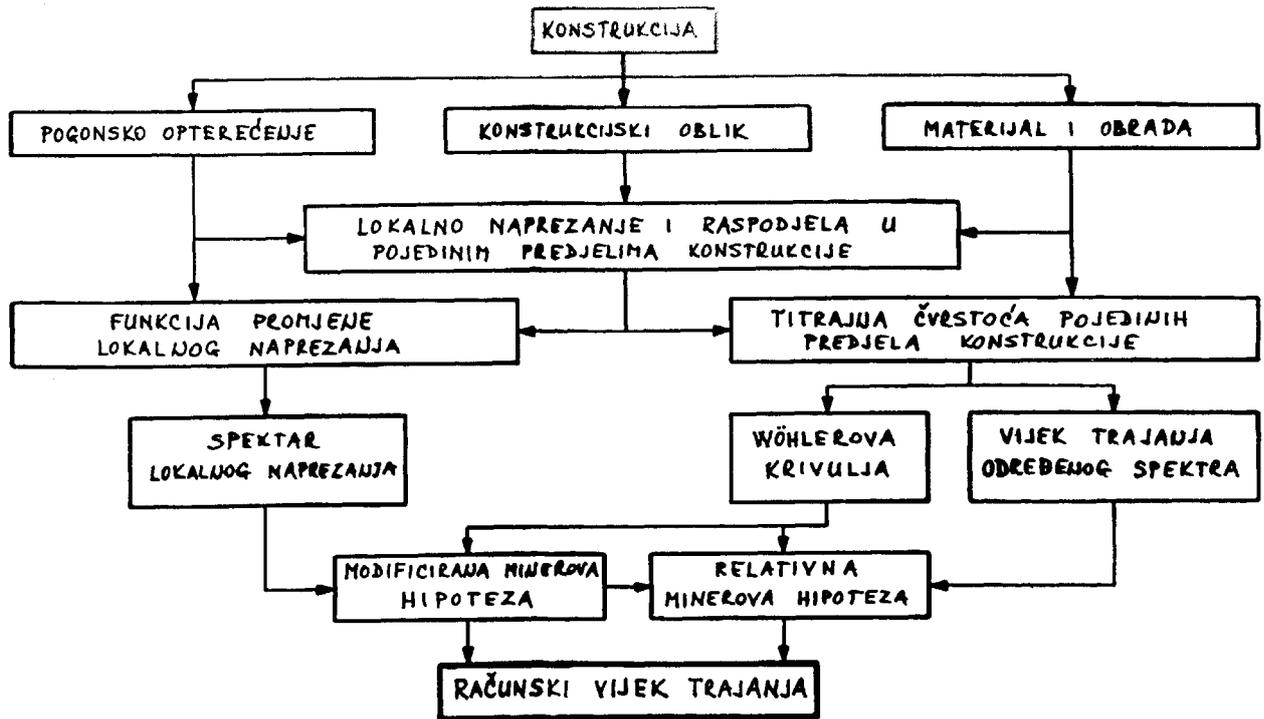
Slika 4.1 Koncepti proračuna vijeka trajanja.



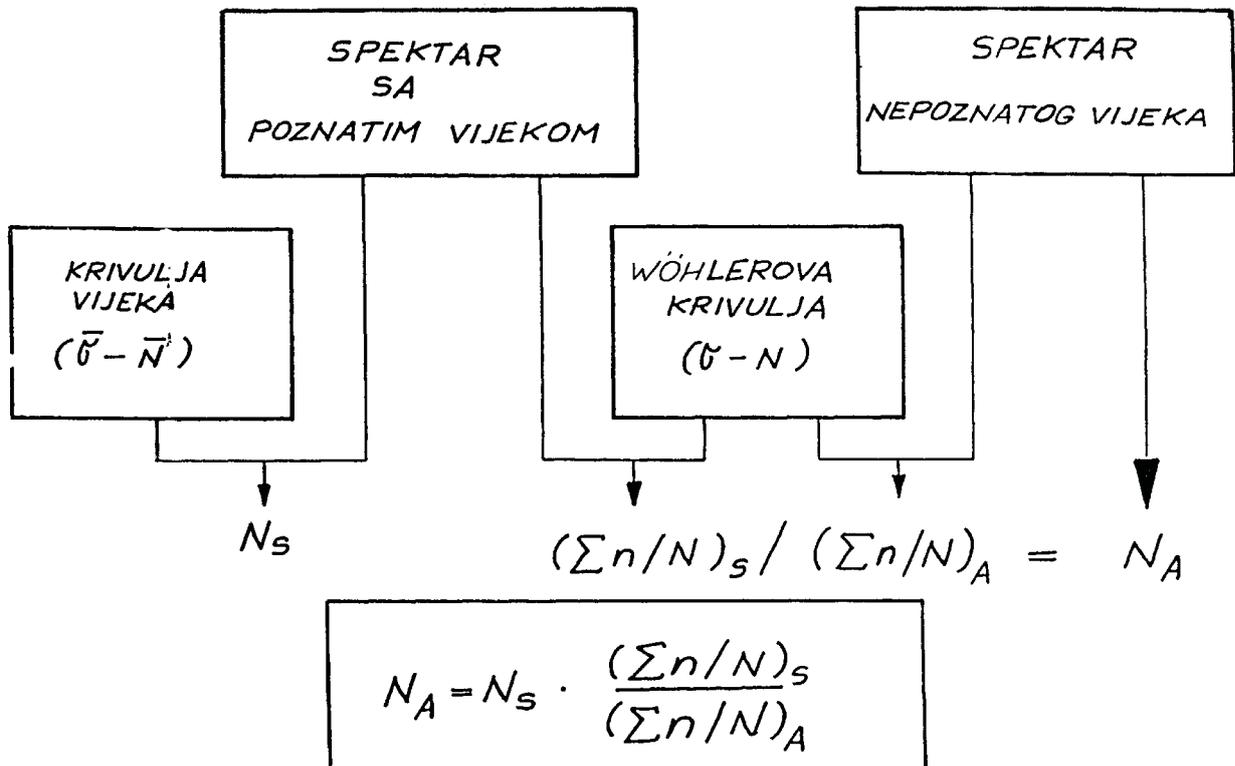
$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = D \quad \text{Akumulacija zamora}$$

Slika 4.2 Linearna akumulacija zamora (Palmgren - Miner).

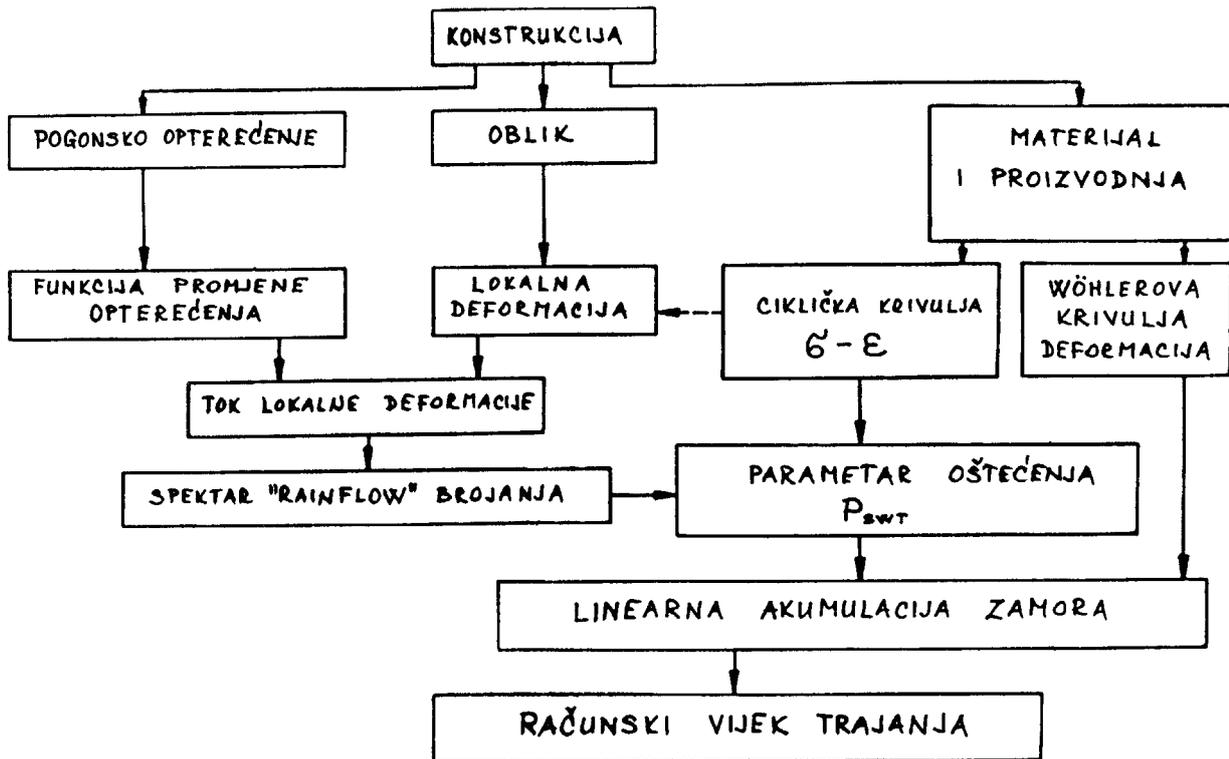




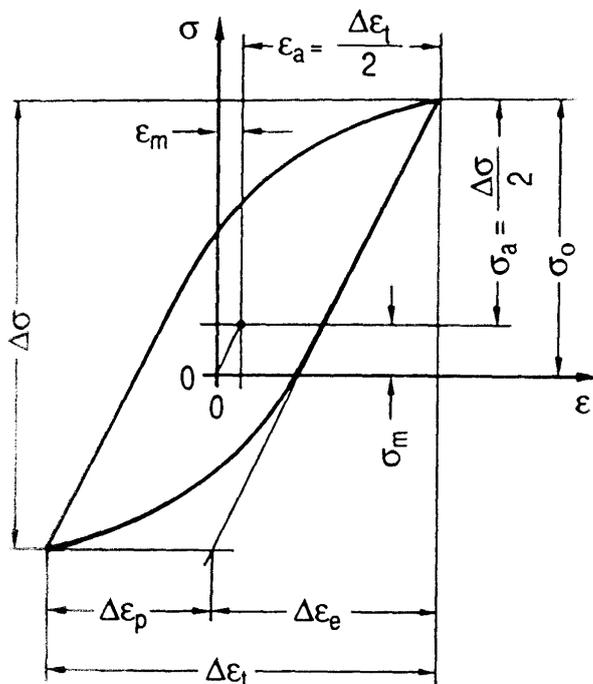
Slika 4.5 Proračun vijeka trajanja po lokalnim naprezanjima.



Slika 4.6 Određivanje vijeka trajanja relativnim Minerovim proračunom.



Slika 4.7 Proračun vijeka trajanja po lokalnim deformacijama.



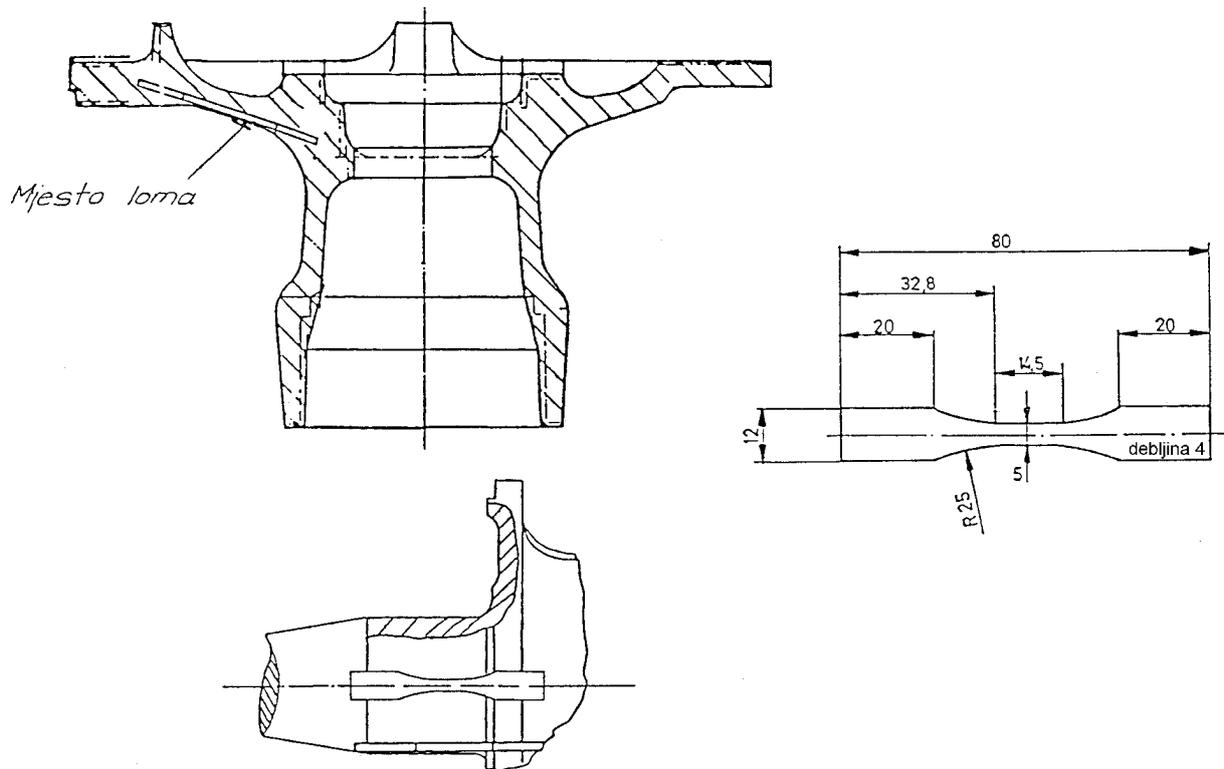
$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_0 \cdot \epsilon_a} \cdot E$$

$$\sigma_0 = \sigma_m + \sigma_a$$

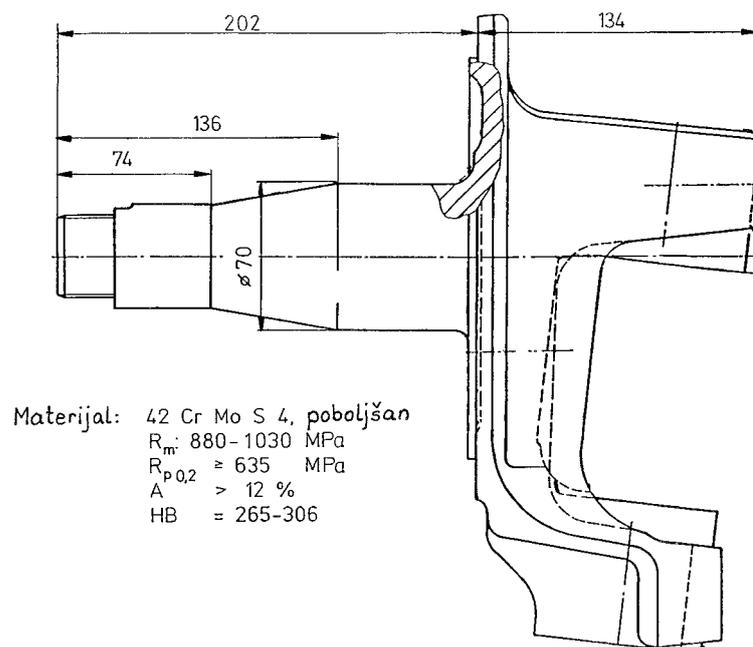
Za slučaj  $\sigma_m < 0$

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_a \cdot \epsilon_a} \cdot E$$

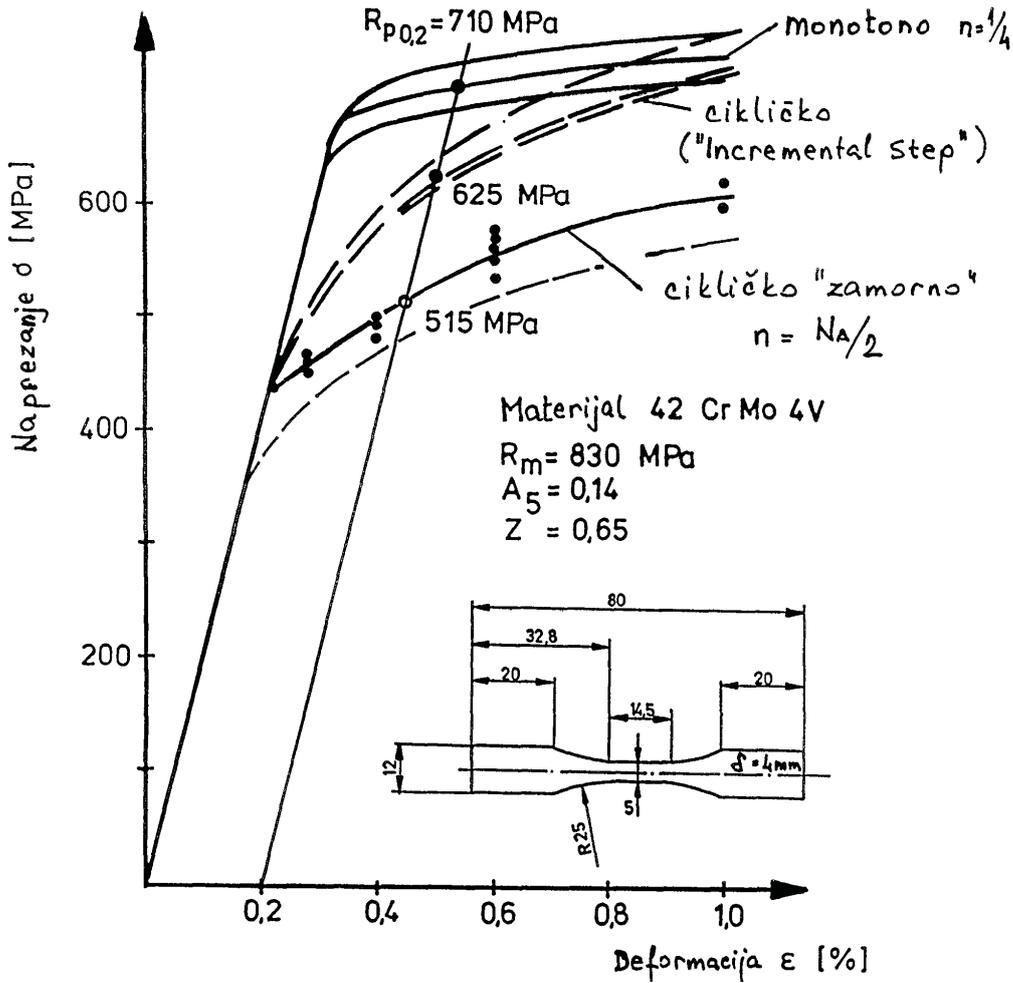
Slika 4.8 Određivanje čimbenika zamora.



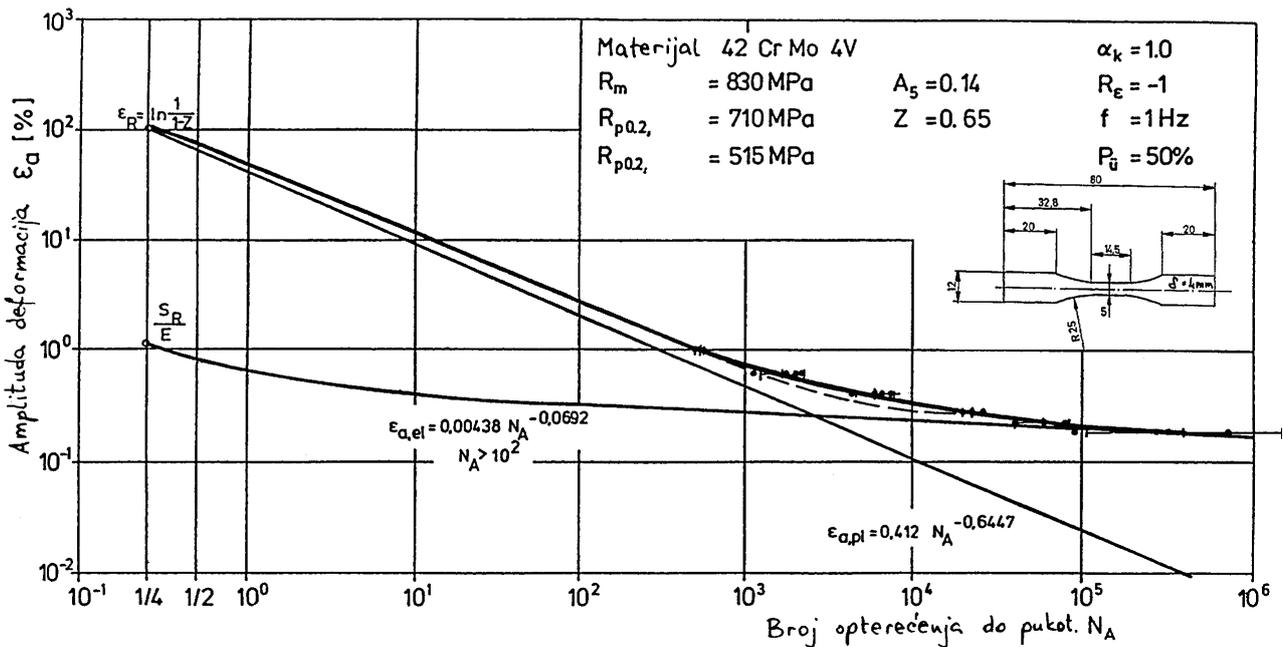
Slika 4.9 Uzimanje probnih epruveta.



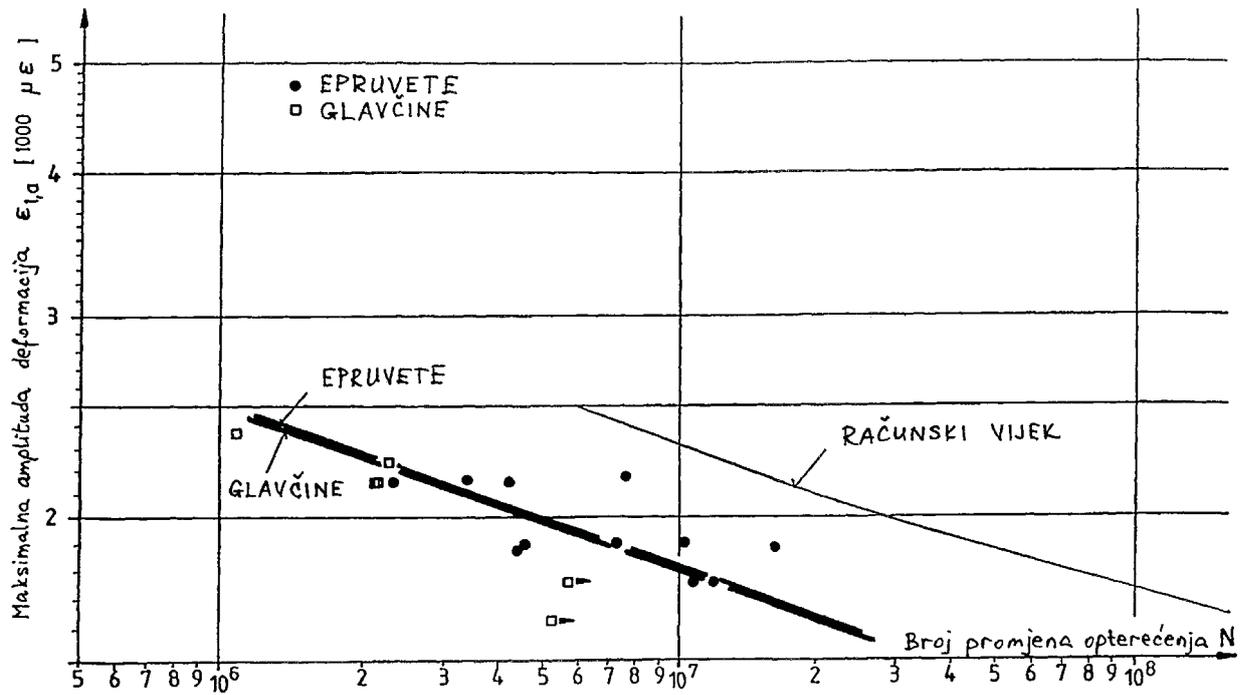
Slika 4.10 Oblik, dimenzije i materijal osovine teretnog vozila.



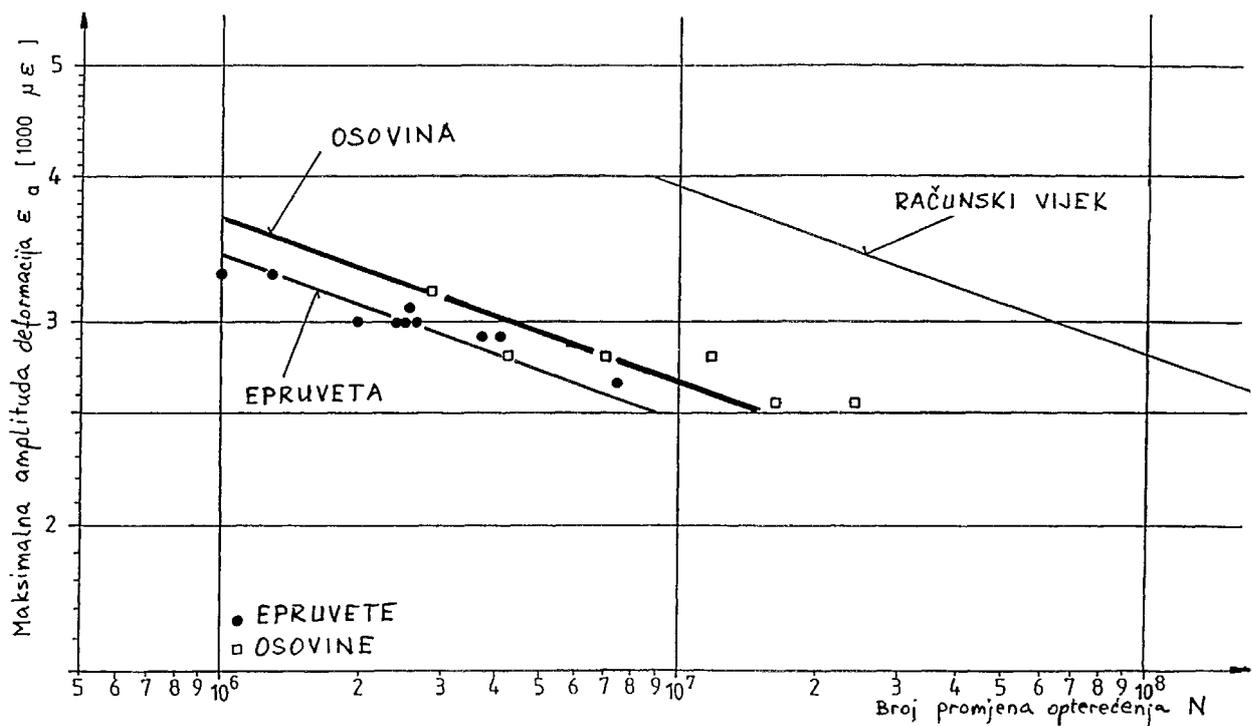
Slika 4.11 Krivulja deformacija-naprezanje.



Slika 4.12 Krivulja čvrstoće pri kontroliranim deformacijama kriterij oštećenja: inicijalna pukotina 1mm<sup>2</sup> (a<1mm).



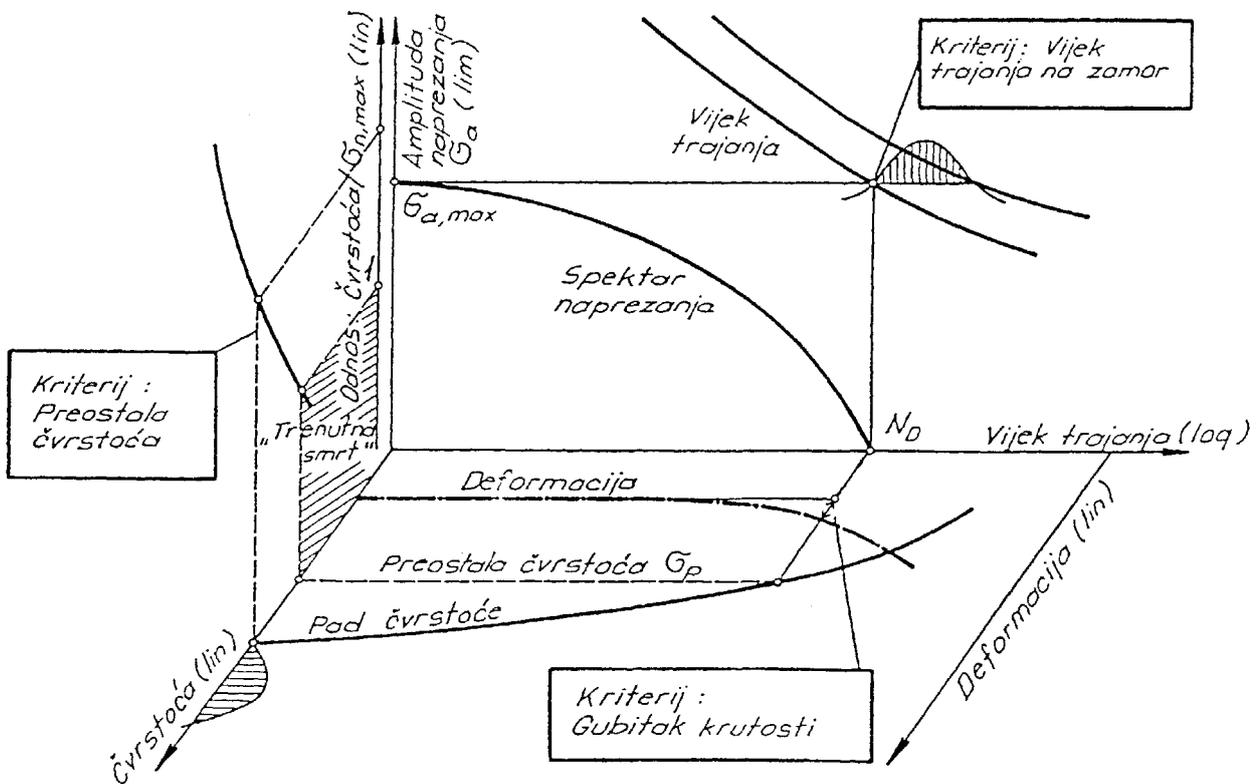
Slika 4.13 Pogonska čvrstoća glavčine određena eksperimentalno i poračunom.



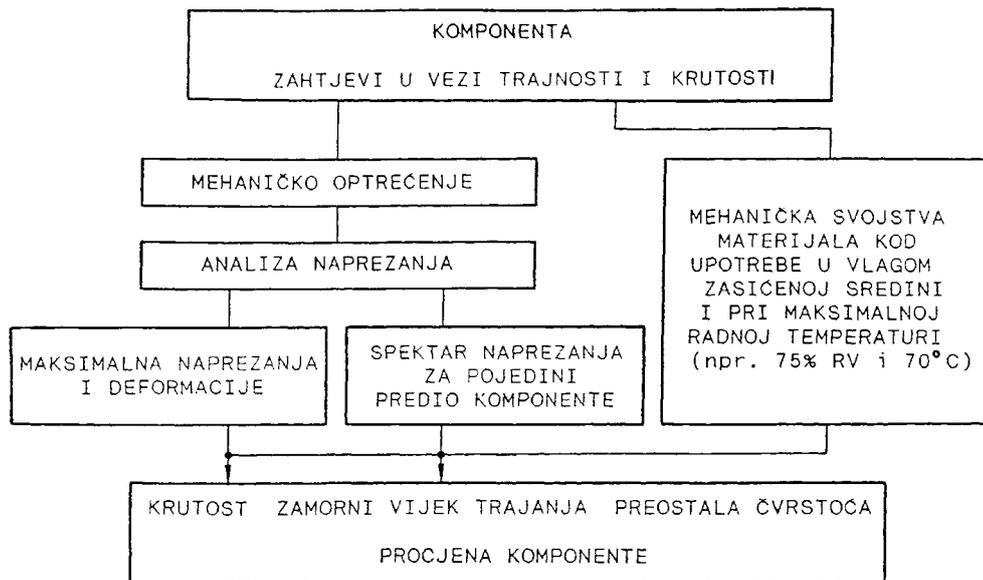
Slika 4.14 Pogonska čvrstoća rukavca određena eksperimentalno i poračunom.

| A   | B   |
|---|---|
| <p>Procjena metodom <u>lokalnih naprezanja</u> polazeći od podataka određenih na <u>konstrukciji</u> ili odgovarajućim probnim uzorcima:</p> <p>- modifikacija Wöhlerove krivulje sa:<br/> <math>k' = 2k-1</math> ili <math>2k-2</math><br/>                     (zavarene i lijevane konstrukcije, legure lakih metala)</p> <p>- spektar srednje vrijednosti ako postoji razlika između brojanja predjela i prolaza kroz nivoe:</p> <p style="text-align: center;"><math>N_R = (N_0/D_R) D_d</math></p> <p style="text-align: center;"><b><math>D_d=0.5</math></b></p> | <p>Procjena metodom <u>lokalnih deformacija</u> polazeći od podataka čvrstoće materijala pod kontroliranim deformacijama:</p> <p style="text-align: center;"><math>N_R = (H_0/D_R) d_{\epsilon,t} d_{\epsilon,x} d_p</math></p> <p><math>d_{\epsilon,t} = 0.2 \dots 0.5</math><br/>                     (<math>d_{\epsilon,t}</math> manji za veću promjenu srednje vrijednosti <math>\epsilon = f(t)</math>)</p> <p><math>d_{\epsilon,x} = 1.0 \dots 0.5</math><br/>                     (<math>d_{\epsilon,x}</math> ovisi o veličini visokonapregnutog volumena)</p> <p><math>d_p = 0.1 \dots 200</math><br/>                     (<math>d_p</math> ovisan o tehnologiji izrade)</p> <p style="text-align: center;"><b><math>D_d \approx 0.01 \div 50</math></b></p> |

Slika 4.15 Faktori korekcije kod teorijske procjene vijeka trajanja (samo orijentacijske vrijednosti).



Slika 4.16 Kriterij za procjenu komponenti iz ojačanih plastika.



Slika 4.17 Postupak procjene komponenti iz ojačanih plastika.

### POTREBNI PODACI ZA PROCJENU TRAJNOSTI KOMPONENTI IZ OJAČANIH PLASTIKA

#### 1. KRITERIJ: VIJEK TRAJANJA NA ZAMOR

1.1  $\bar{\sigma}$  -  $\bar{N}$  krivulja (Wöhlerova krivulja) ili  $\bar{\sigma}$  -  $\bar{N}$  krivulja (krivulja vijeka trajanja) kod  $P = 10\%$  i kriterija loma "20% - tni gubitak krutosti" ( $d_0/d_o = 1.2$ ) i  $\hat{R} = \hat{R}_{pog}$

1.2 Spektar lokalnih naprezanja kod pogonskog opterećenja

$$\sigma_{maks} \text{ i } \sigma_{min} \rightarrow \bar{\sigma}_a = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}; \bar{R} = \sigma_{min} / \sigma_{maks}$$

Spektar naprezanja  $\bar{\sigma}_a = f(N)$

Broj ciklusa opterećenja  $N_D$

Vjerojatnost postizanja inteziteta spektra  $P_D \leq 1\%$

Procjena vijeka trajanja na zamor temeljena na proračunu zbirnog (kumulativnog) oštećenja:

$$L_S = N_S = (D_f / D_p) N_D$$

$L_S \hat{=} N_S$  = Očekivani vijek trajanja na zamor

$D_p$  = Izračunato oštećenje za spektar sa  $N_D$  ciklusa

$D_f$  = Dopušteni iznos oštećenja (npr. 0.1%)

#### 2. KRITERIJ: LOMNA ČVRSTOĆA

2.1 Pad statičke čvrstoće kod vijeka trajanja na zamor -  $N_D$

2.2 Maksimalno nazivno naprezanje u pogonu  $\sigma_{n,maks}$  u pojedinim presjecima, uzimajući u obzir prednaprezanja uzrokovana izradom i rijetka preopterećenja ili moguće (neželjene) zloupotrebe.

Procjena kao inženjerski pristup:

$$\sigma_{n,maks} \leq \frac{\sigma_o}{K_F}$$

$\sigma_o$  = Statička čvrstoća kod 75% relativne vlage i maksimalne radne temperature.

$K_F$  = Faktor ovisan o svojstvima materijala kod 20% - tskog gubitka krutosti.

#### 3. KRITERIJ: GUBITAK KRUTOSTI

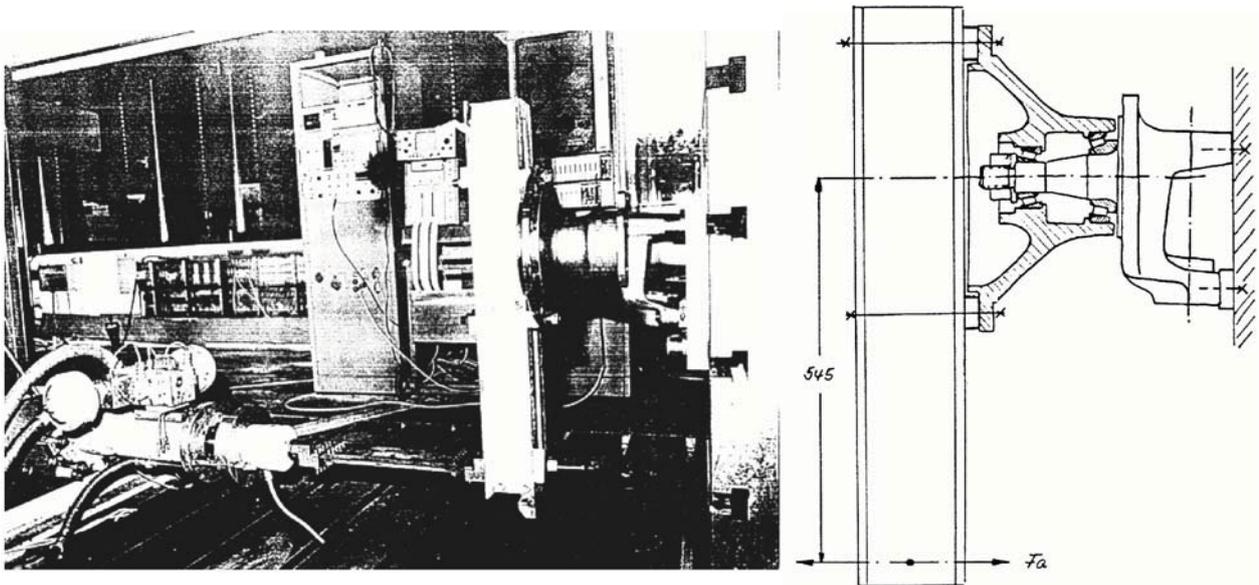
3.1  $E_t/E_o$  promjena uvjetovana pogonskim opterećenjem

3.2 Zahtjevi u vezi maksimalno dopuštene deformacije  $d_{dop}$

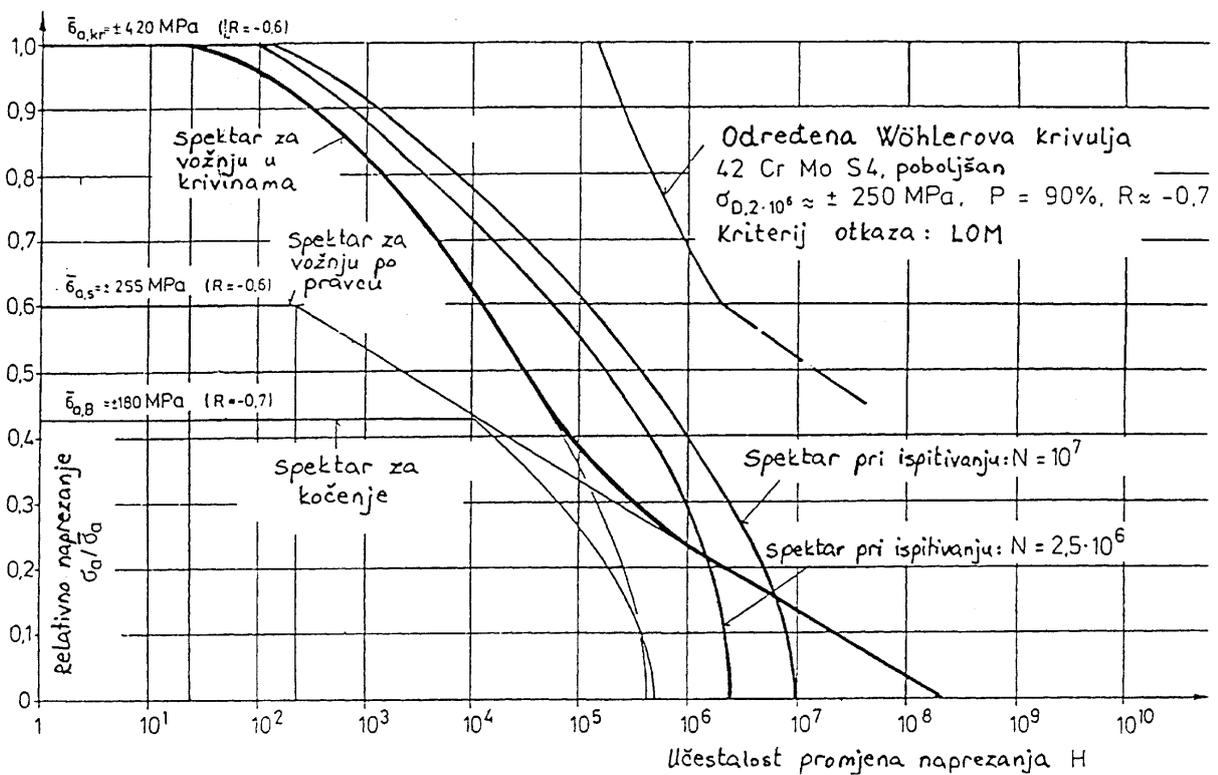
Procjena: Za kriterij zamornog loma "20% - tni gubitak krutosti" treba samo provjeriti da li je:

$$1.2 d_o < d_{dop}$$

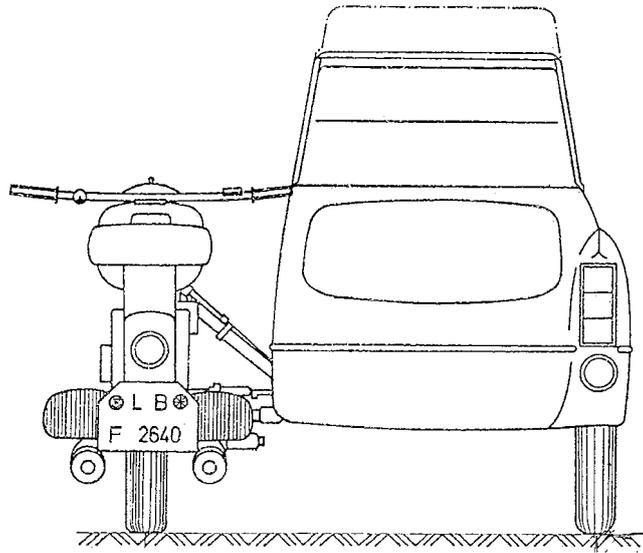
$d_o$  = Inicijalna deformacija kod maksimalnog opterećenja ( $\sigma_{n,maks}$ )



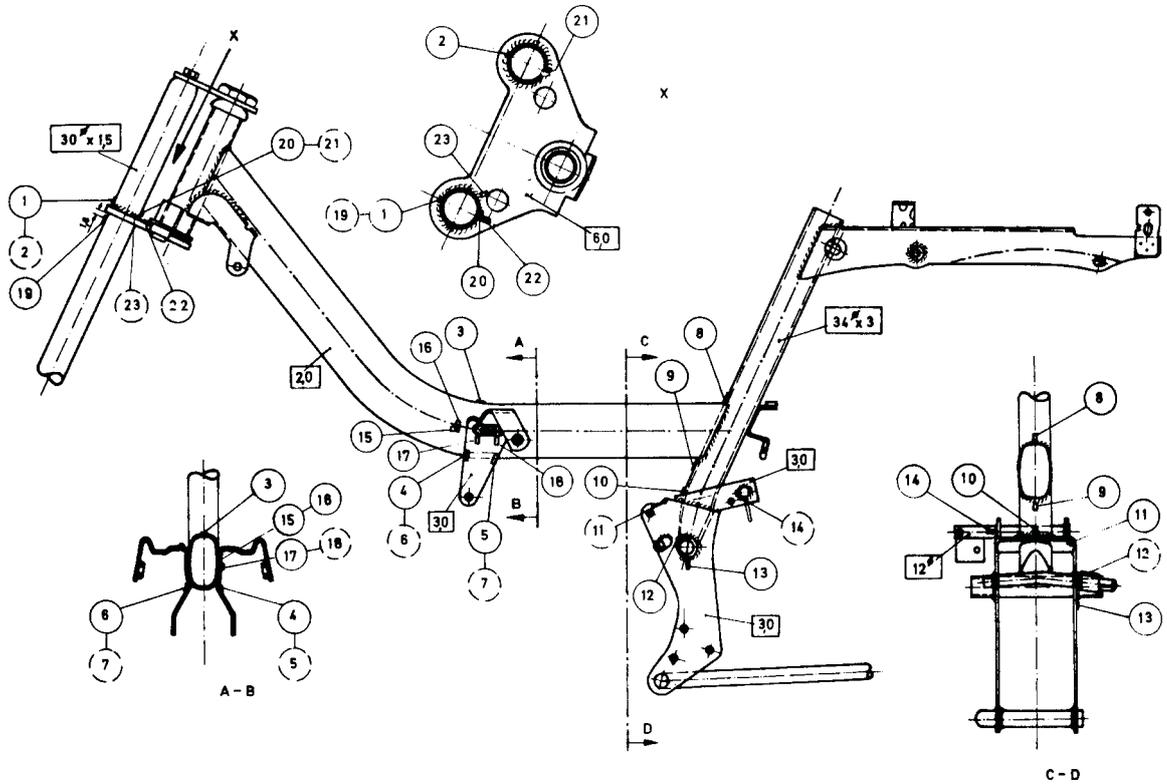
Slika 4.18 Simulacija spektra pogonskog opterećenja na osovini i glavčini kotača.



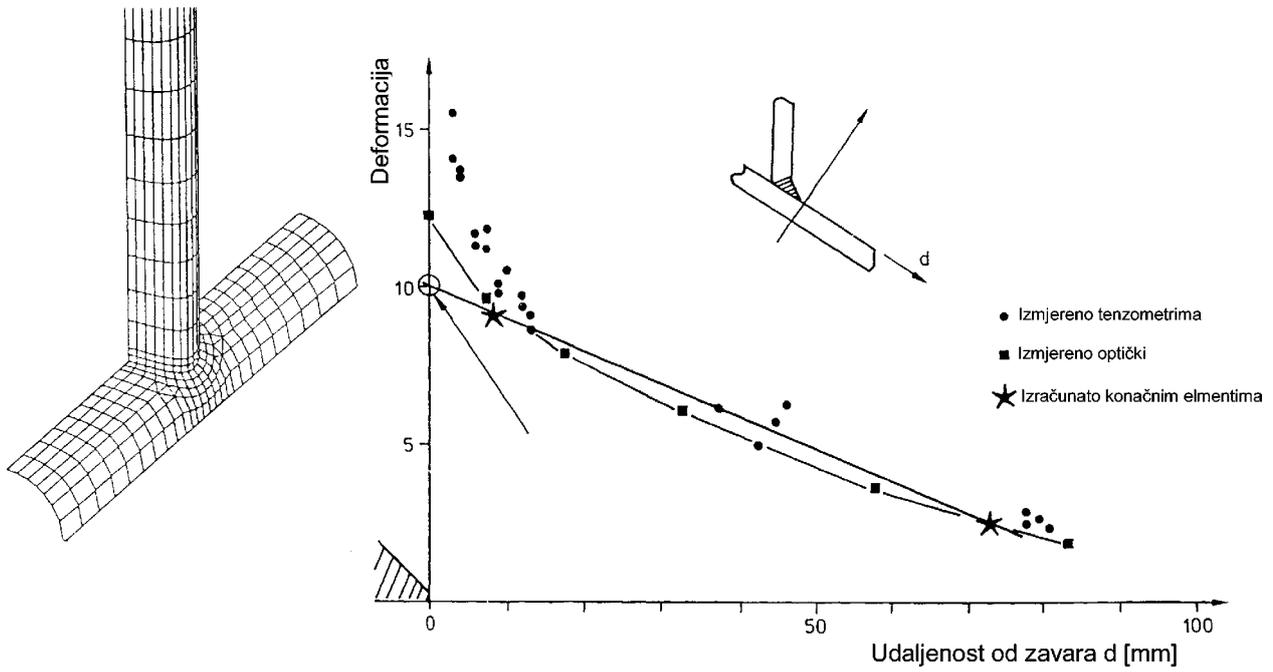
Slika 4.19 Konstrukcijski spektar naprezanja za 500000km i Wöhlerova krivulja.



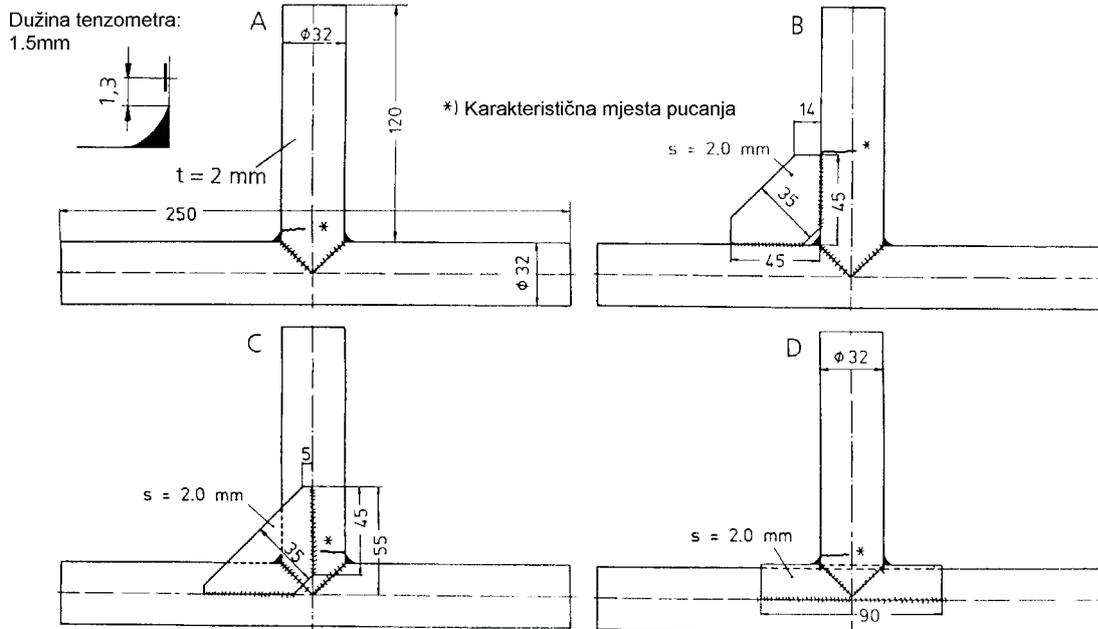
Slika 4.20 Motorcikel s prikolicom.



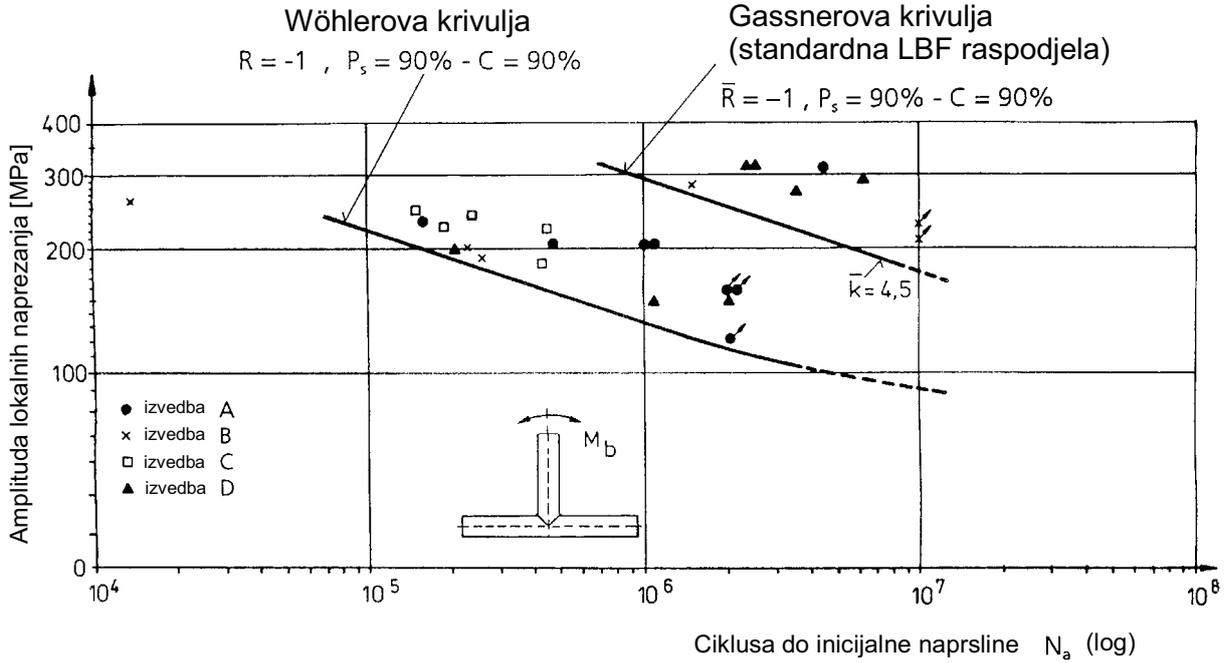
Slika 4.21 Okvir lakog motorcikla i raspored tenzometara.



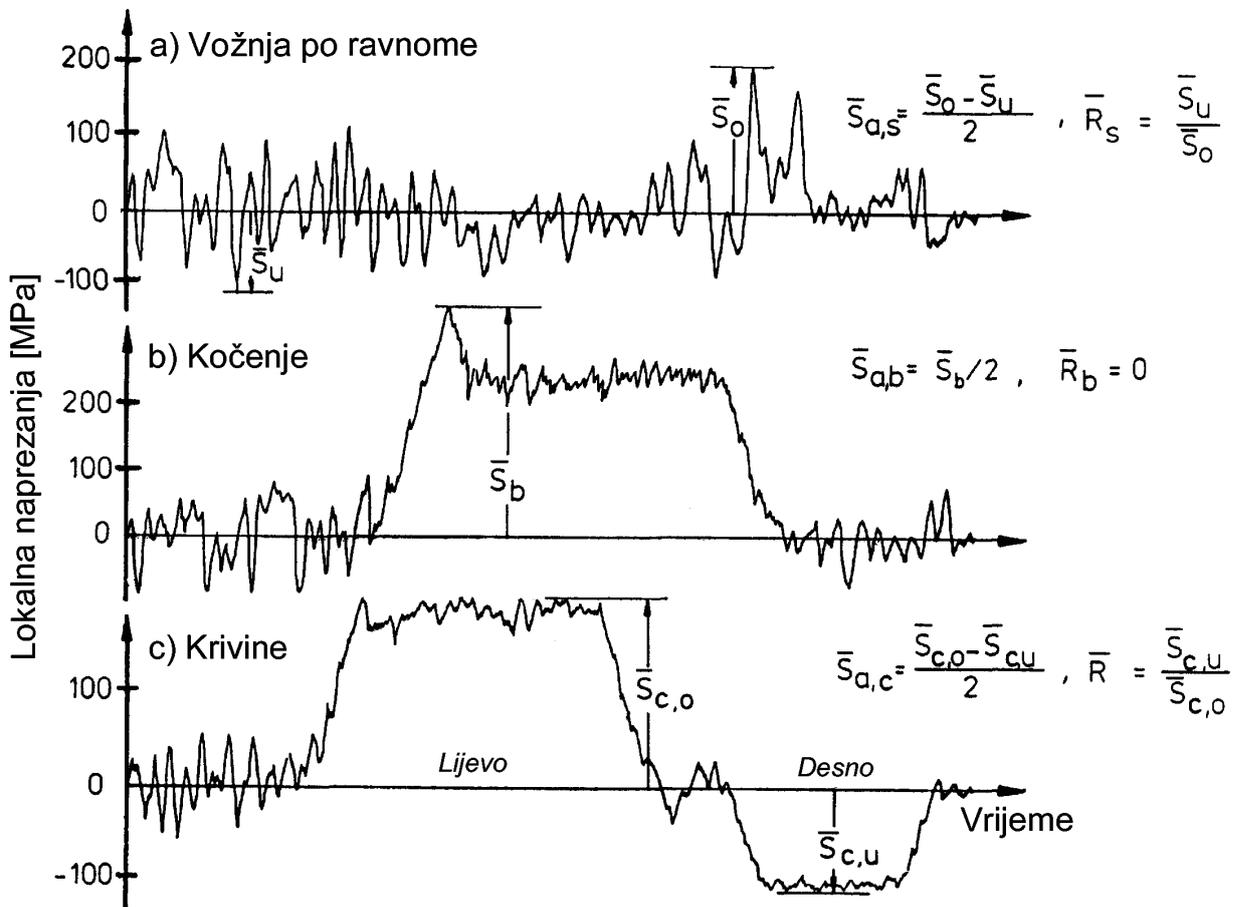
Slika 4.22 Određivanje "žarišnog" napreznja.



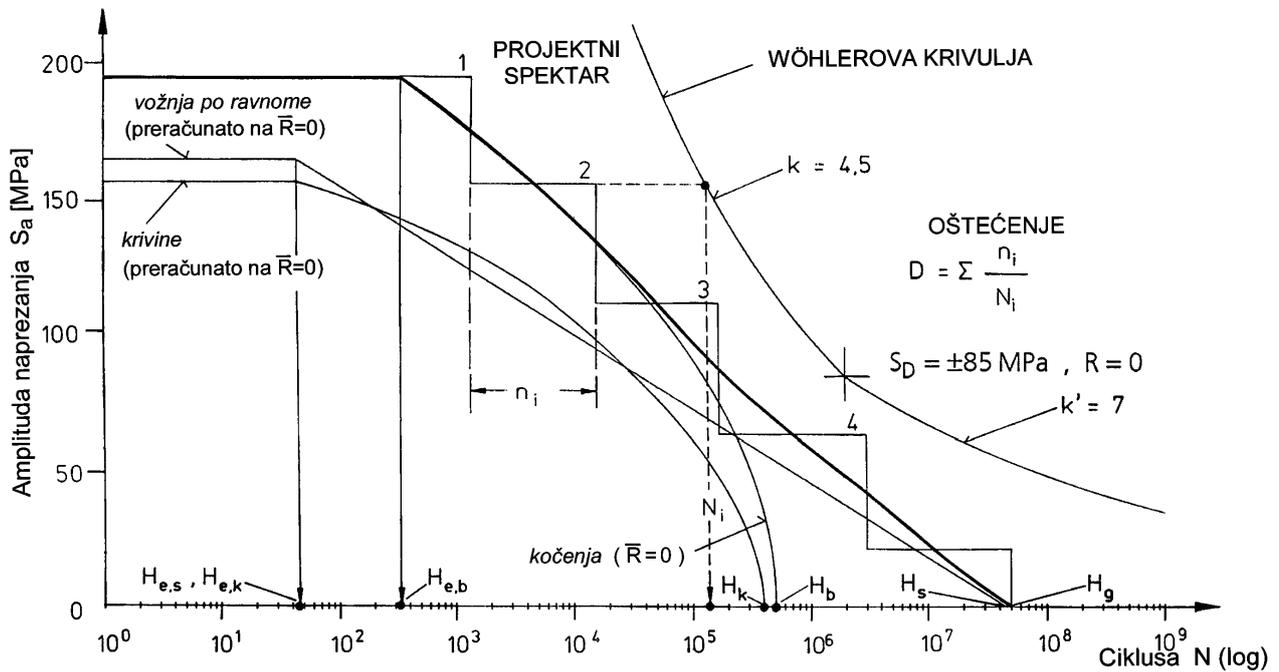
Slika 4.23 Ispitivani uzorci zavarenih cijevi (materijal St 35).



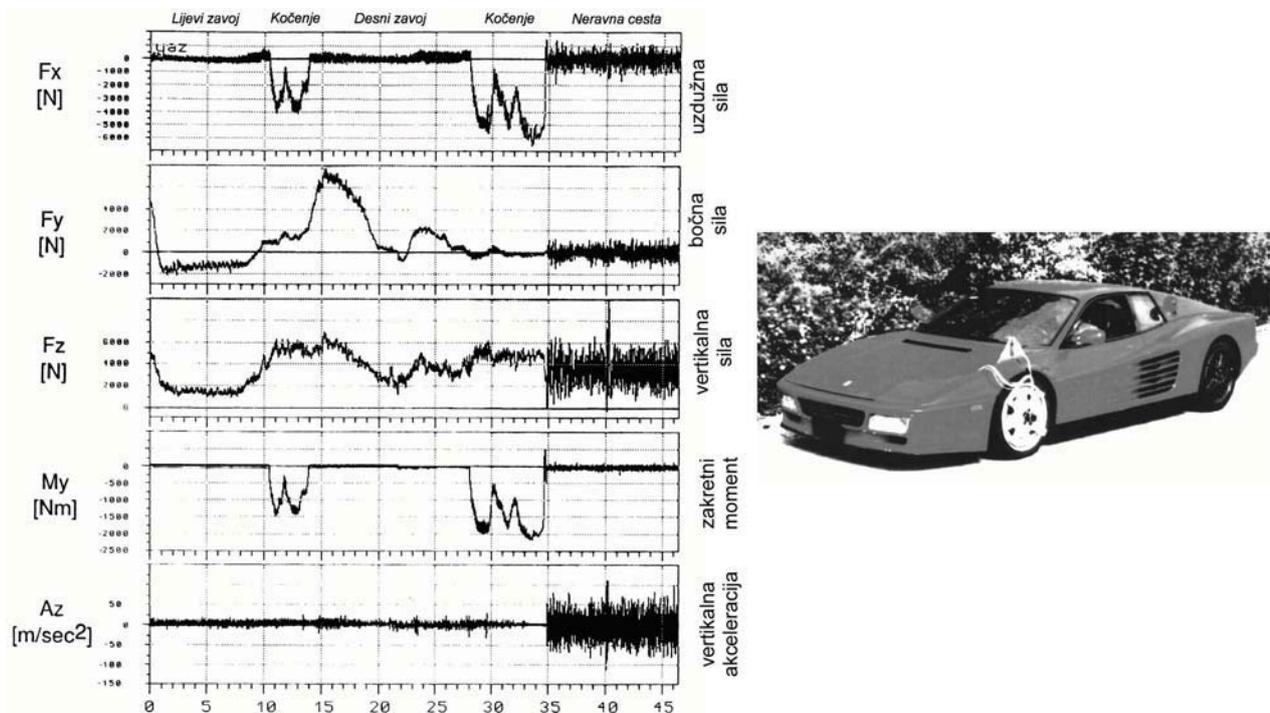
Slika 4.24 Čvrstoća pod promjenljivim opterećenjima zavarenih cijevi (materijal St 35).



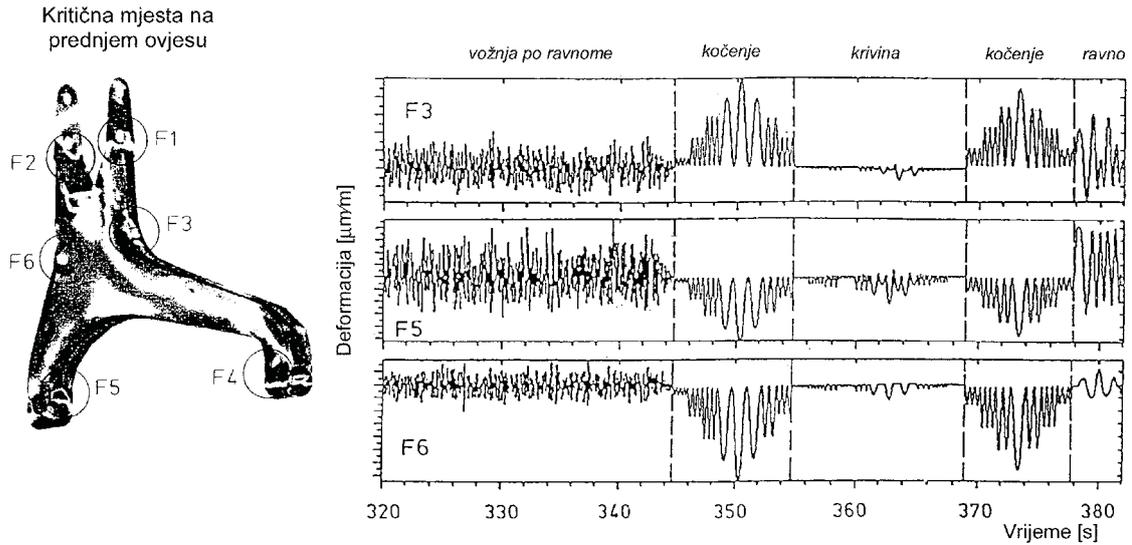
Slika 4.25 Promjena pogonskih naprezanja.



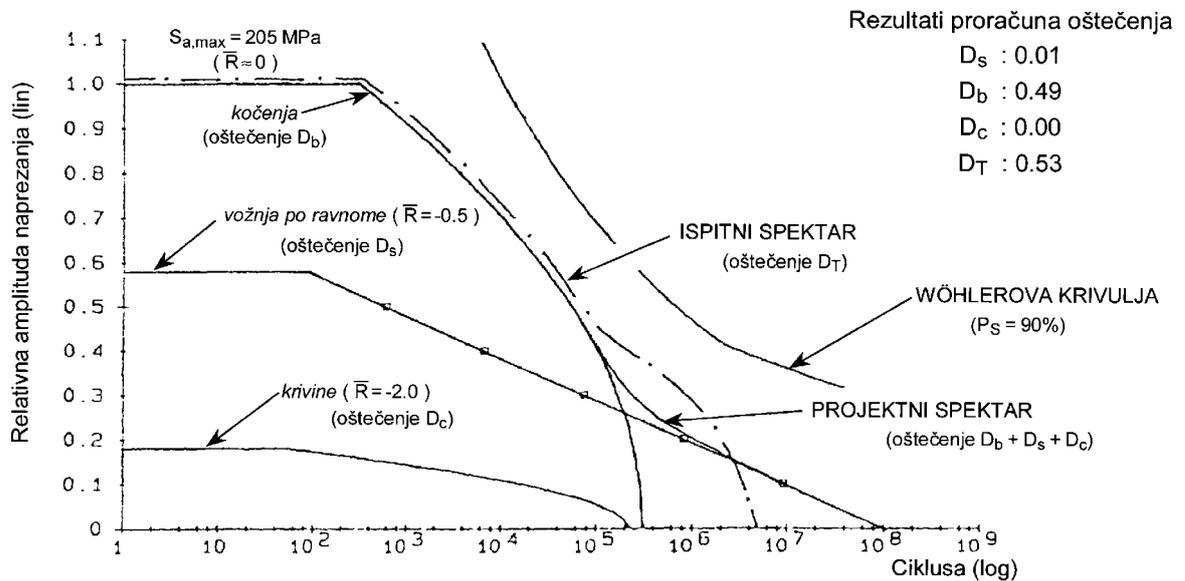
Slika 4.26 Spektri pojedinih vrsta opterećenja i procjena oštećenja.



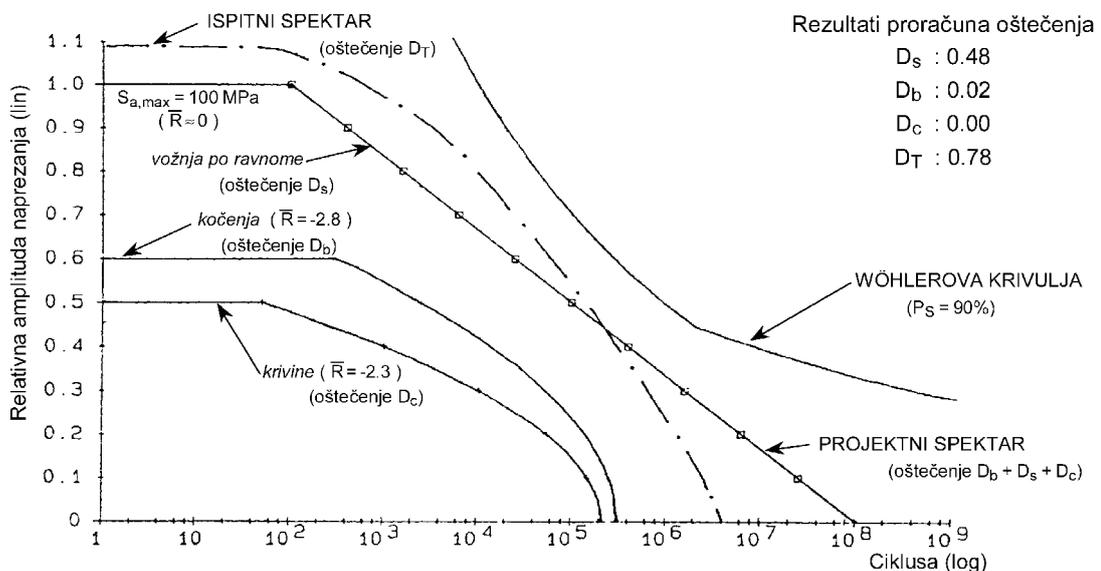
Slika 4.27 Određivanje sila na vozilu Ferrari Testarossa pomoću mjernog kotača "VELOS 8J x 18".



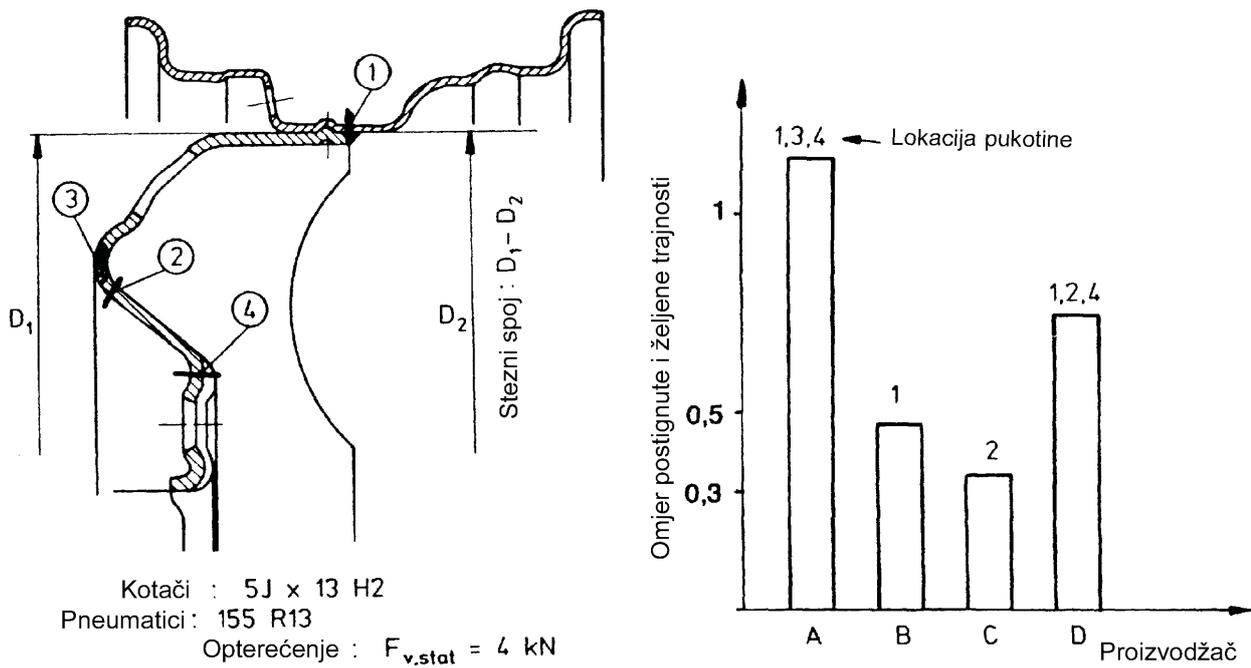
Slika 4.28 Izmjerene deformacije na kritičnim mjestima.



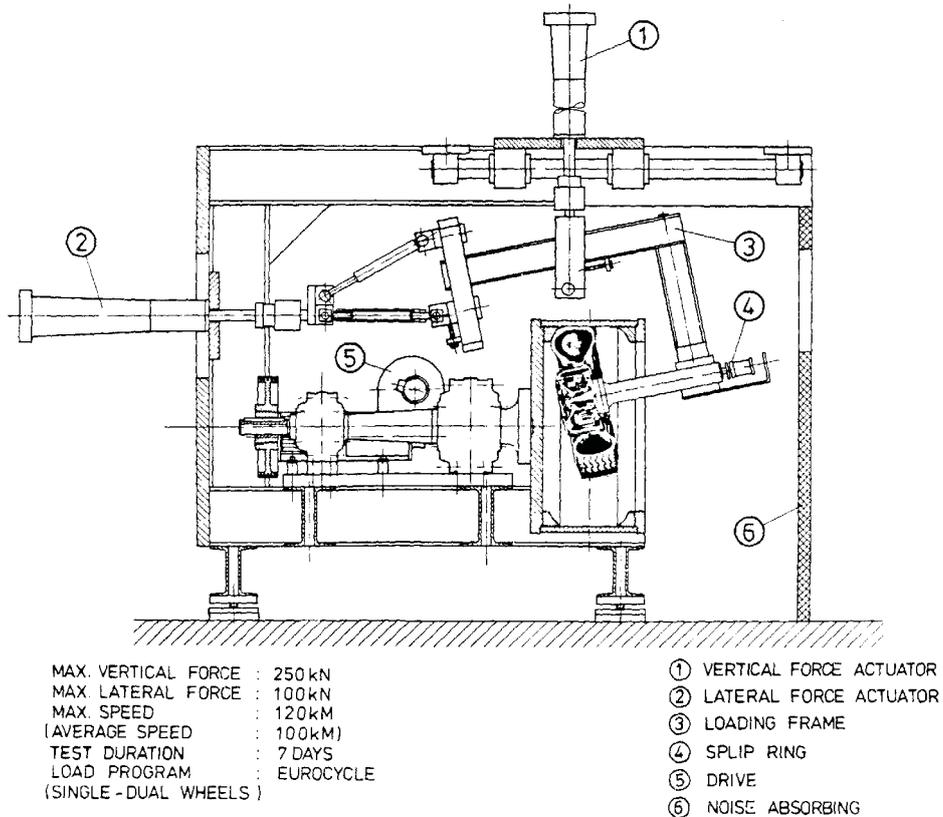
Slika 4.29 Poredba proračuna za 300 000 km ispitnog spektra (područje F3).



Slika 4.30 Poredba proračuna za 300 000 km ispitnog spektra (područje F5).

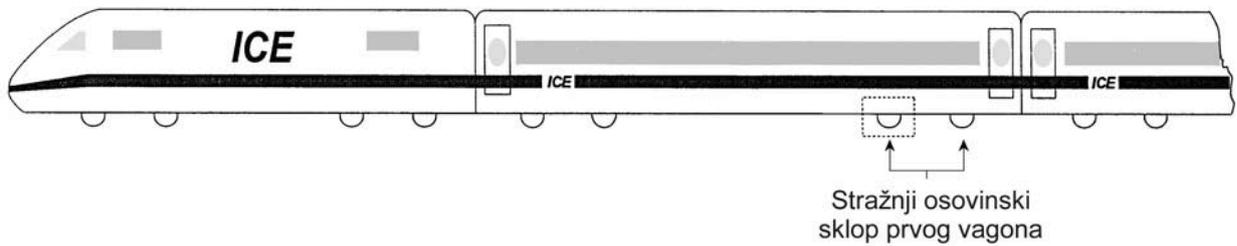


Slika 4.31 Utjecaj proizvodnog postupka na vijek trajanja.

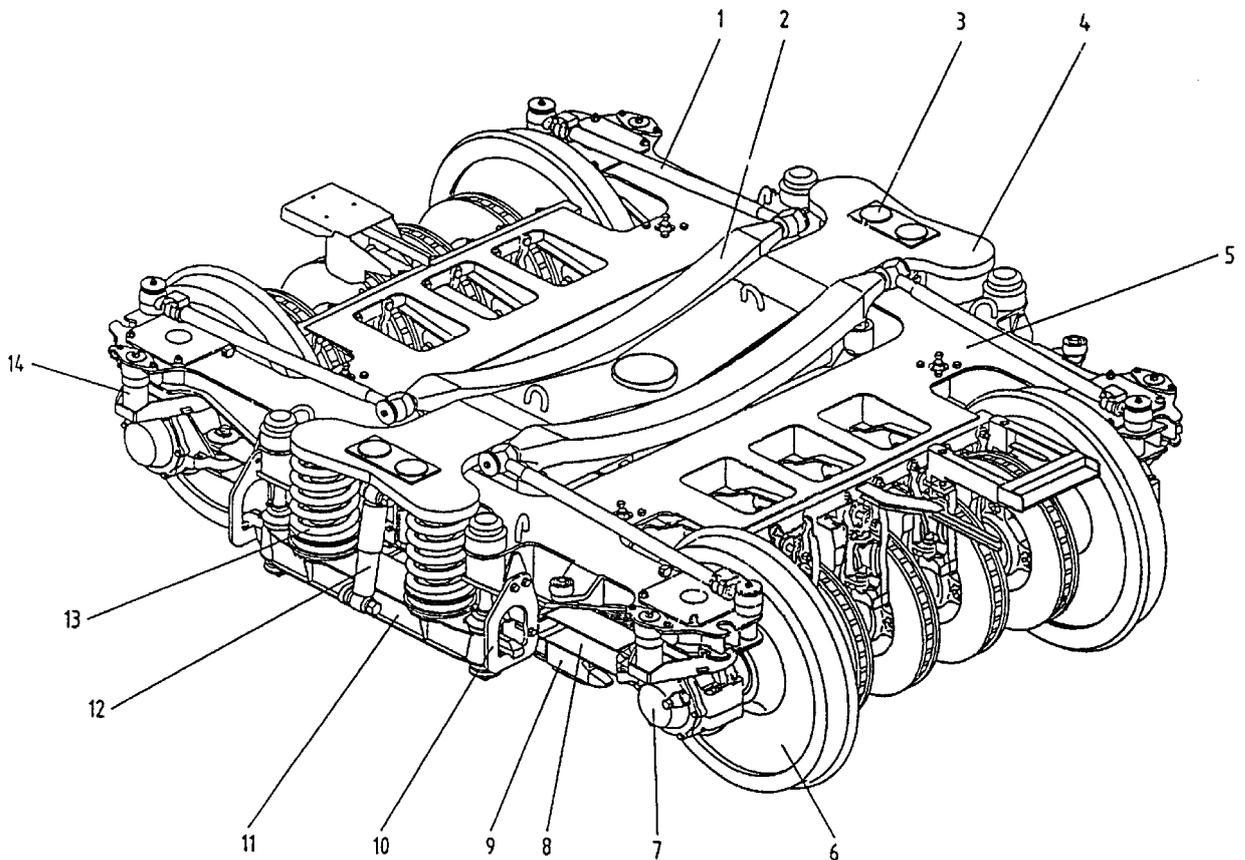


Slika 4.32 Dvoosni simulator za ispitivanje kotača.

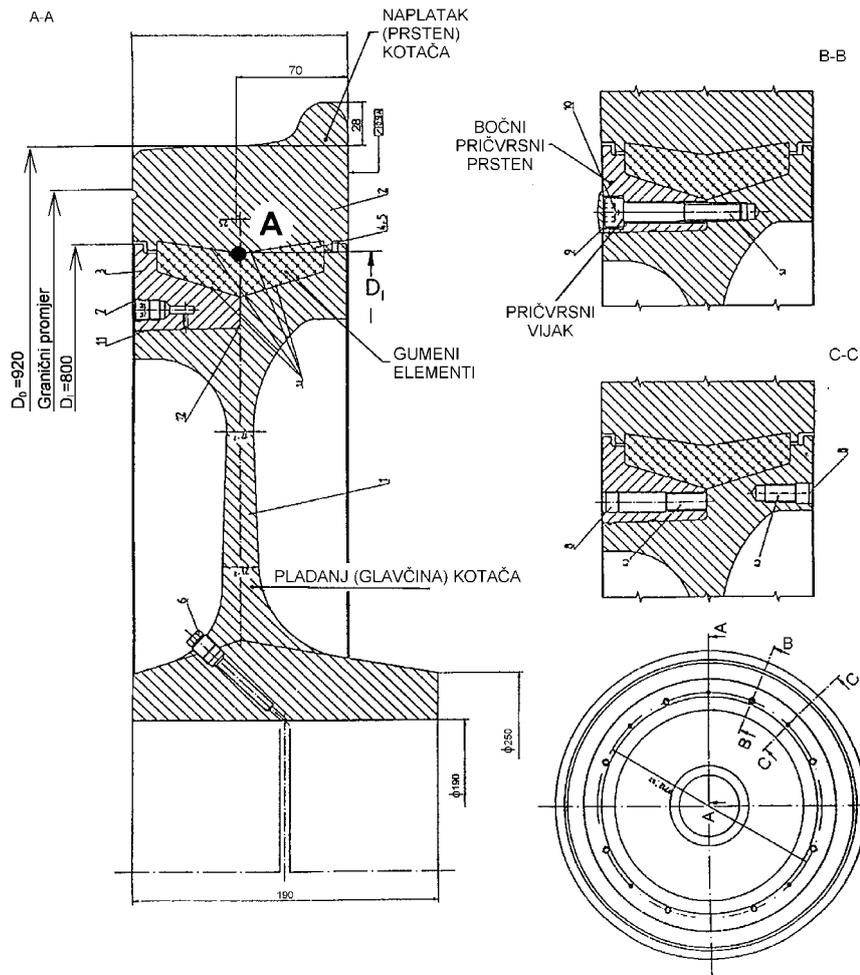
## Primjer visokobrzinskog vlaka ICE 2 njemačkih željeznica.



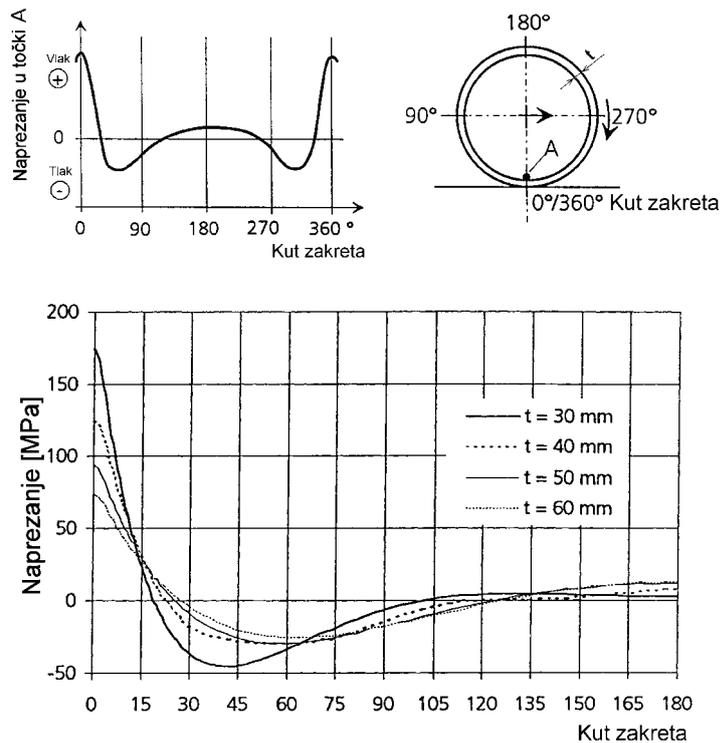
Slika 4.33 Visokobrzinski vlak ICE 2 njemačkih željeznica (2 lokomotive i 11 vagona).



Slika 4.34 Osovinski sklop podvozja vagona visokobrzinskog vlaka njemačkih željeznica ICE 2.



Slika 4.35 Konstrukcija višedijelnog elastičnog kotača BA 064.



Slika 4.36 Promjena napreznja u točki A naplatka kotača, debljine  $t=60$  mm do 30 mm.

## PODACI ZA PROVJERU POGONSKJE ČVRSTOĆE VIŠEDIJELNOG ELASTIČNOG KOTAČA BA 064

### 1. OPTEREĆENJA:

$$Q_{\text{stat}} = 80 \text{ kN}$$

1.1 Vožnja po pravcu ("sinusno kretanje"):

$$Q = 144 \text{ kN} \quad n_Q = 1.8$$

$$Y = \pm 18 \text{ kN}$$

1.2 Vožnja u krivini:

$$Q = 109 \text{ kN} \quad n_Q = 1.36$$

$$Y = \pm 56 \text{ kN}$$

1.3 Vožnja preko skretnica:

$$Q = 160 \text{ kN} \quad n_Q = 2.0$$

$$Y = \pm 70 \text{ kN}$$

### 2. MATERIJAL:

Čelik za kotače C60, standard UIC 510:

○  $R_m = 763 \pm 44 \text{ MPa}$ ,  $R_{p,0.2} = 468 \pm 28 \text{ MPa}$ ,  $A \geq 14\%$

○ procjena trajne titrajne čvrstoće ( $P_S = 99\%$ ,  $R = -1$ ):

$$\sigma_{D, \text{dozv}} = 0.44 \cdot R_m \cdot b_G \cdot b_Z / S \quad (1)$$

$b_G$  - faktor uvjetovan proizvodnjom i debljinom  $\Rightarrow$  prema podacima je  $b_G = 0.8$ ;

$b_Z$  - utjecaj hrapavosti površine  $\Rightarrow$  tokareno sa  $R_Z = 30 \mu\text{m}$  pa je  $b_Z = 0.7$ ;

$S$  - faktor sigurnosti da bi se postiglo  $P_S = 99\%$   $\Rightarrow$  prema tablicama  $S = 1.5$ .

$$\sigma_{D, \text{dozv}} = \pm 125 \text{ MPa za } R = -1$$

uz ostale utjecaje ( $R = -0.3$  umjesto  $R = -1$ ):

$$\sigma_{D, 10^7} = \pm 120 \text{ MPa}$$

ili:

$$\sigma_{a, 2 \times 10^6} = \pm 140 \text{ MPa za } P_S = 90\% \quad (k = 5 \rightarrow N < 10^7, k' = 2k - 2 = 8 \rightarrow N > 10^8).$$

### 3. Korištenje – ICE mreža u Njemačkoj:

450000 km na godinu do dozvoljenog graničnog promjera  $D_{\text{min}}$ .

○ početni promjer kotača  $D_0 = 920 \text{ mm} \Rightarrow$  debljina prstena  $t = 60 \text{ mm}$ ,

○ granični promjer  $D_{\text{min}} = 860 \text{ mm} ? \Rightarrow t_{\text{min}} = 30 \text{ mm}$ .

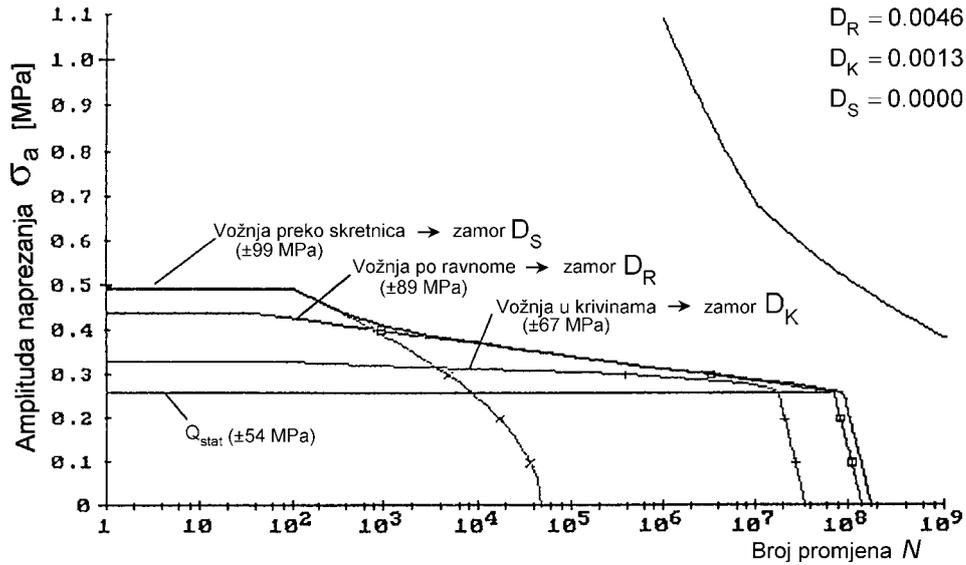
#### **Spektar pogonskog opterećenja**

$$\text{za } D = 860 \text{ mm} : N_t = \frac{4.5 \cdot 10^5 \cdot 10^3}{D \cdot \pi} = 1.66 \cdot 10^8 \text{ okreta kotača}$$

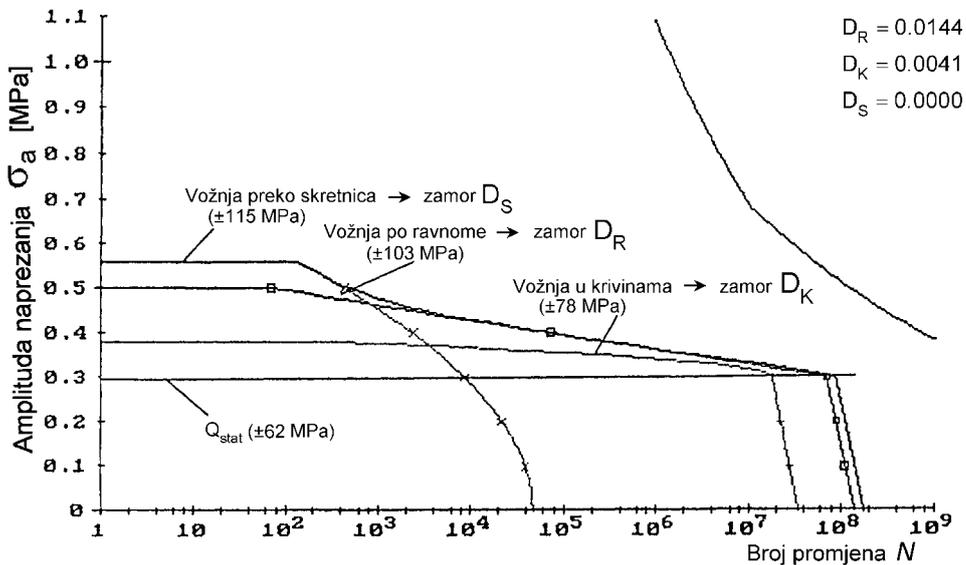
$$N_b = \frac{N_t}{2} = 8.3 \cdot 10^7 \text{ ciklusa}$$

$N_e \rightarrow$  učestalost ekstremnih vrijednosti

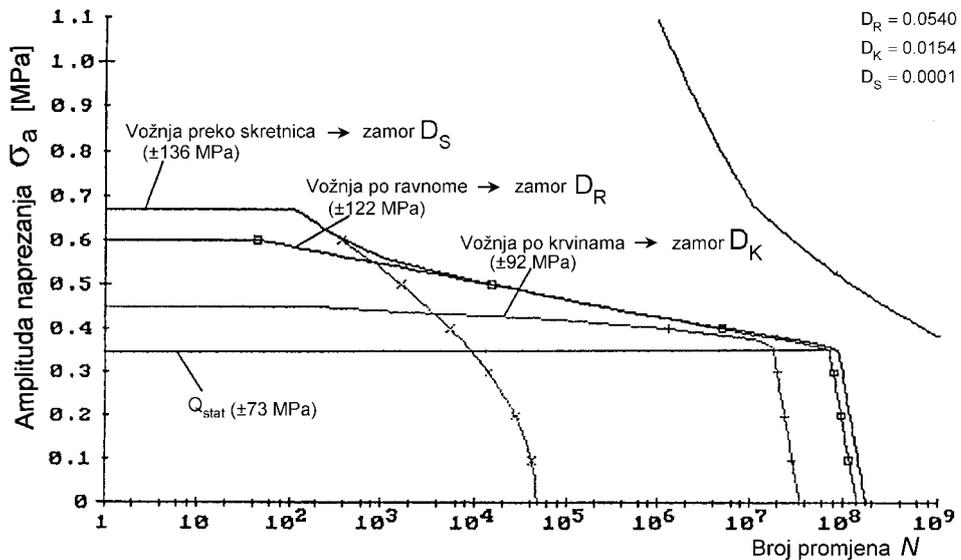
|                       | $N_t$             | $N_b$             | $N_e$ |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------|
| Vožnja po pravcu      | $1.33 \cdot 10^8$ | $6.66 \cdot 10^7$ | 67    |
| Vožnja u zavoju       | $0.33 \cdot 10^8$ | $1.67 \cdot 10^7$ | 105   |
| Vožnja po skretnicama | $45 \cdot 10^3$   | -                 | 129   |



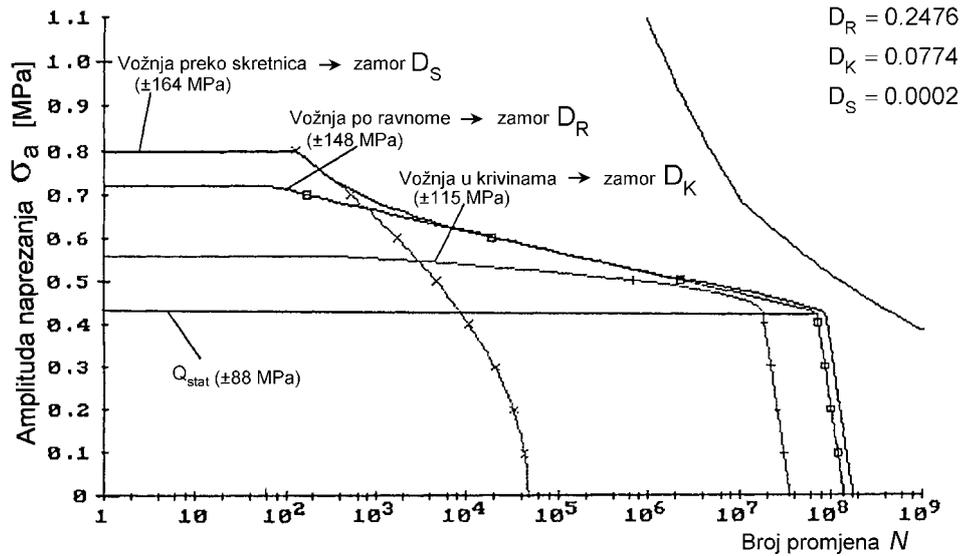
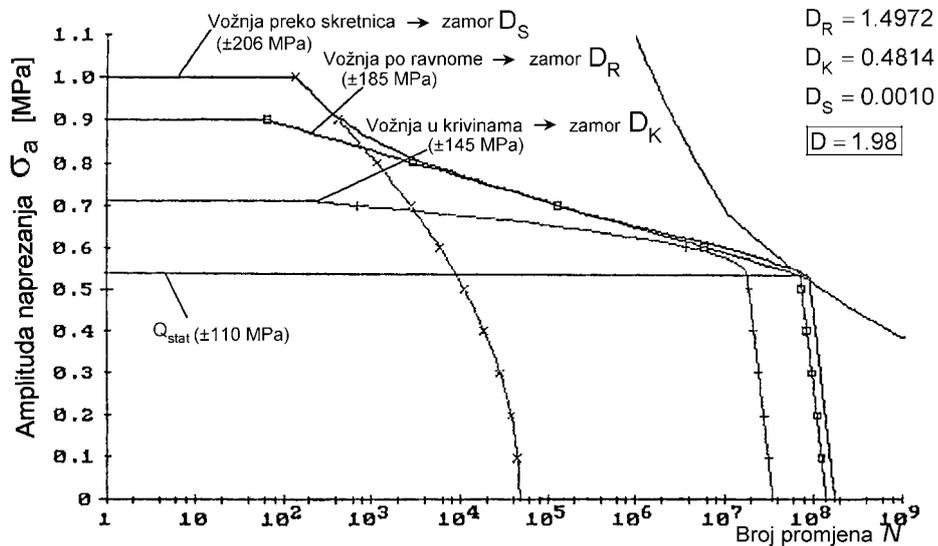
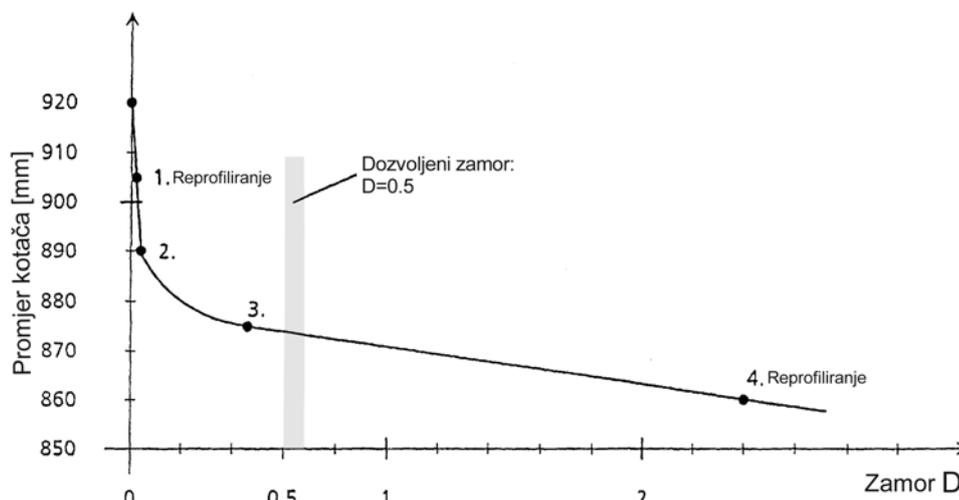
Slika 4.37 Kolektiv naprezanja u prvoj godini ( $D=920$  mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ).



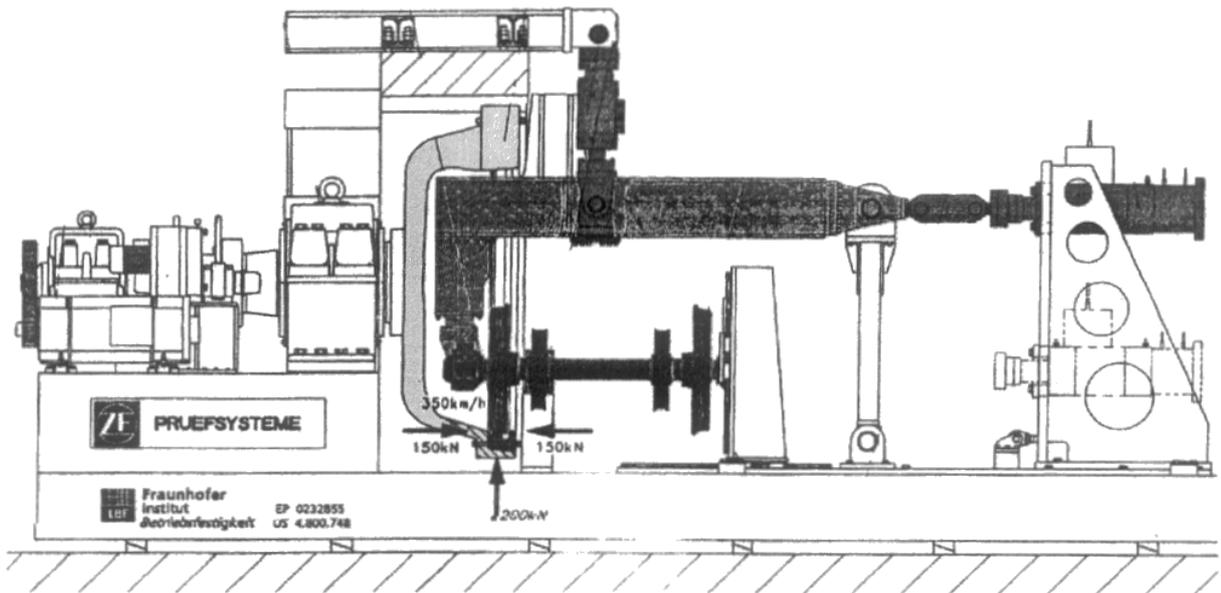
Slika 4.38 Kolektiv naprezanja u drugoj godini ( $D=905$  mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ).



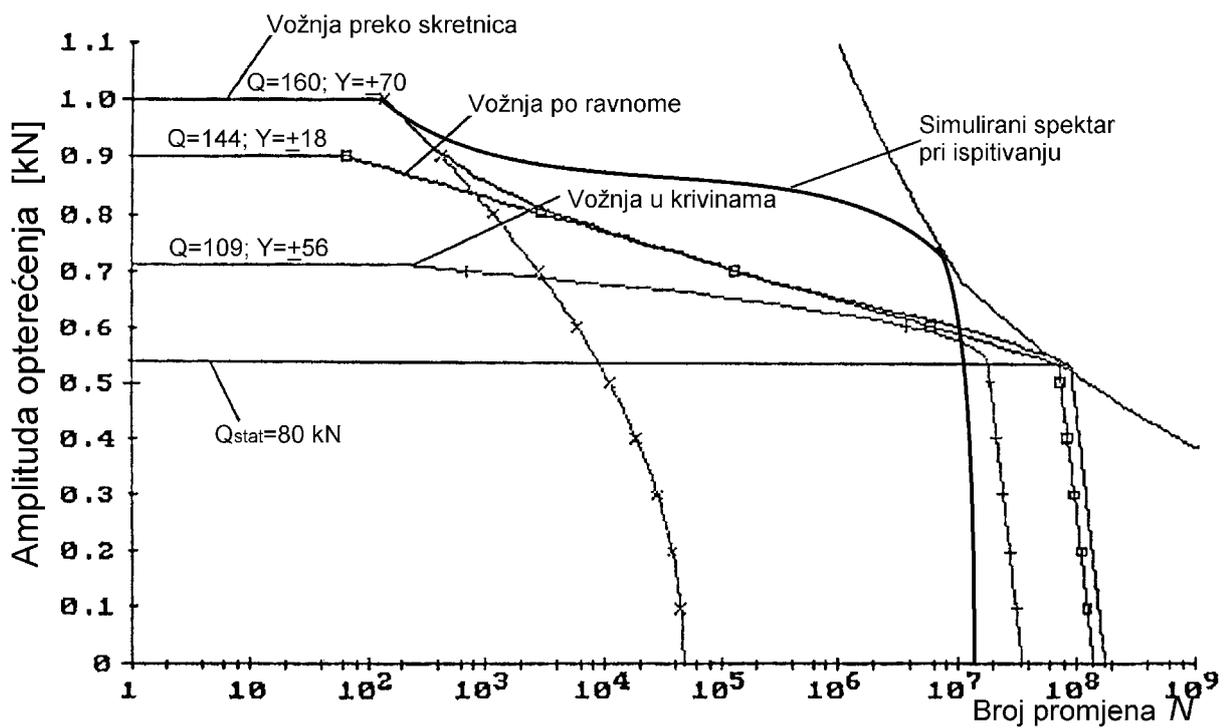
Slika 4.39 Kolektiv naprezanja u trećoj godini ( $D=890$  mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ).

Slika 4.40 Kolektiv naprezanja u četvrtoj godini ( $D=875$  mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ).Slika 4.41 Kolektiv naprezanja u petoj godini ( $D=860$  mm) i akumulacija zamora ( $D_R, D_K, D_S$ ).

Slika 4.42 Ovisnost zamora o promjeru kotača.



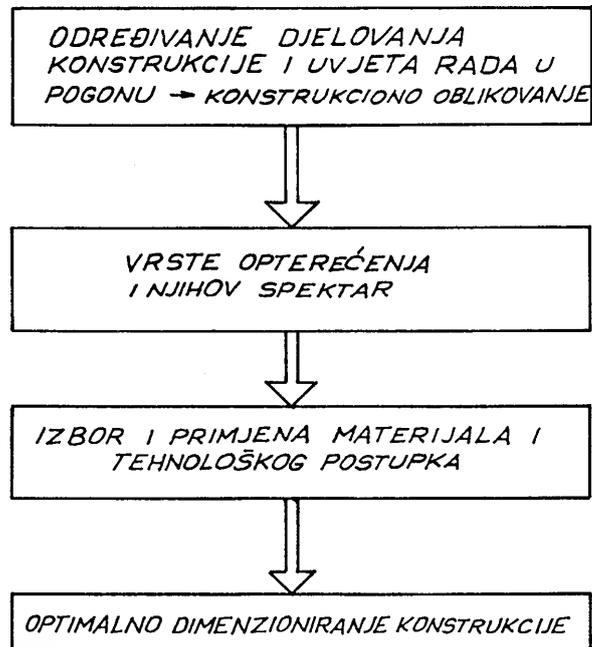
Slika 4.43 Simulator za eksperimentalnu provjeru čvrstoće osovina i kotača vlakova.



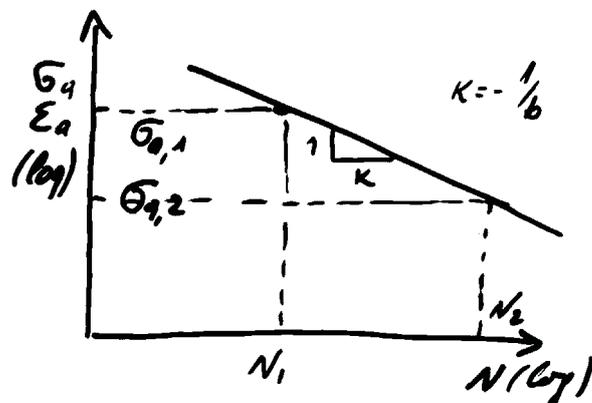
Slika 4.44 Spektr opterećenja u pogonu (450 000 km) i eksperimentalnoj provjeri (40 000 km),  
promjer kotača  $D=860$  mm.



## 5. Utjecaji na pogonsku čvrstoću konstrukcija – uvjeti za optimalno dimenzioniranje.



Slika 5.1 Metodika optimalnog dimenzioniranja konstrukcija.

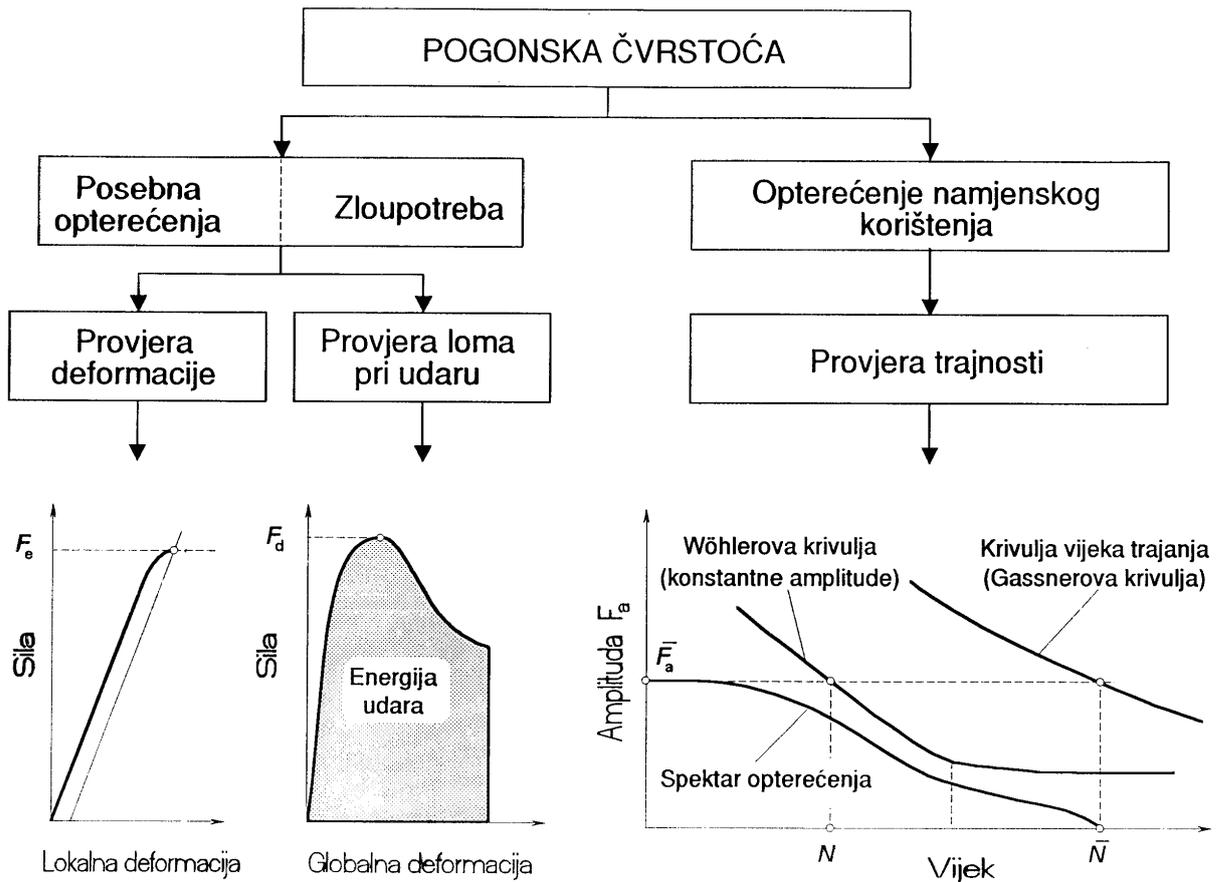


$$N_1 = N_2 \left( \frac{\sigma_{q,2}}{\sigma_{q,1}} \right)^K$$

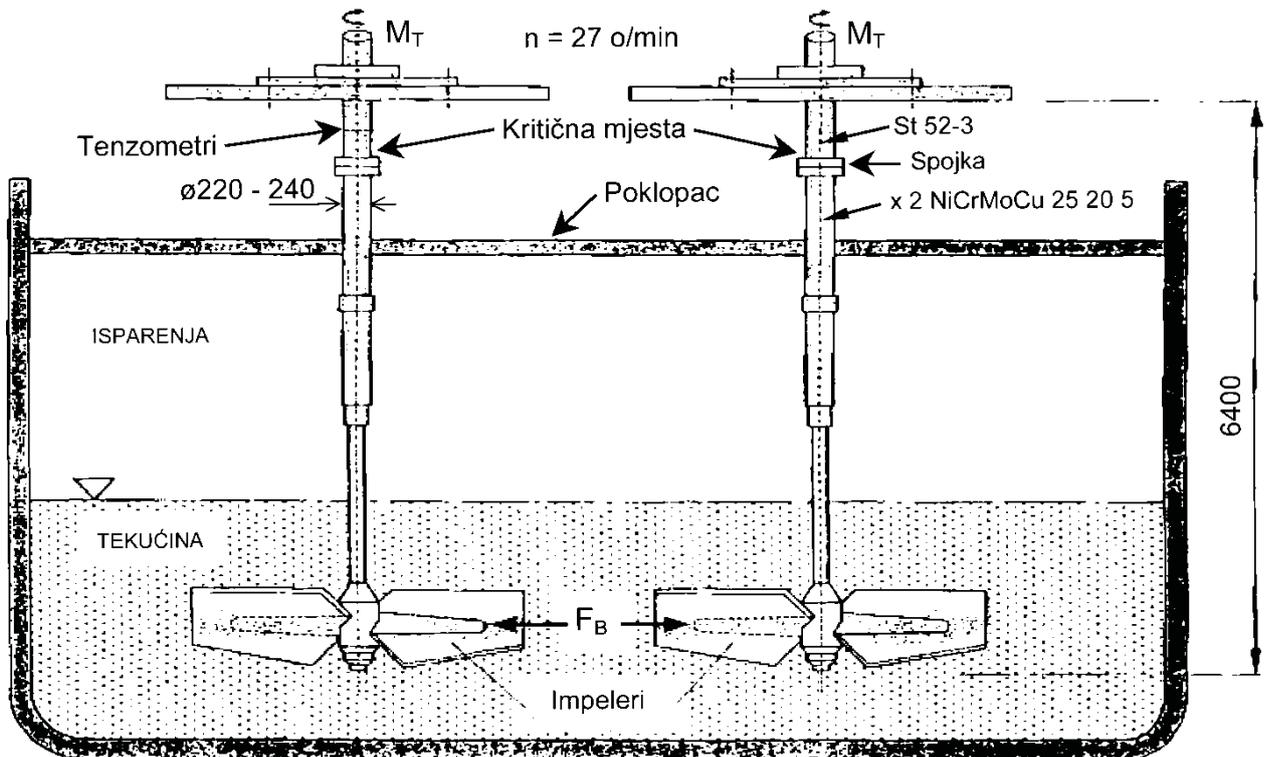
$$N_1 = N_2 \left( \frac{\epsilon_{q,1}}{\epsilon_{q,2}} \right)^{1/6}$$

Primjer  $\sigma_{q,1}$  20% viši od  $\sigma_{q,2}$   
 kod  $K=6 \rightarrow N_1 = \left( \frac{1}{1,2} \right)^6 = 0,28 N_2$

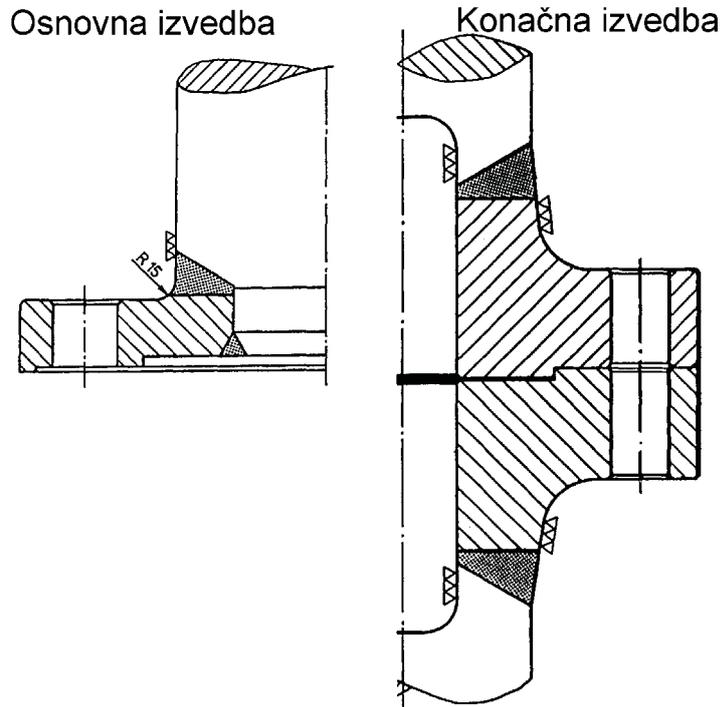
Slika 5.2 Odnos naprezanja i vijeka trajanja.



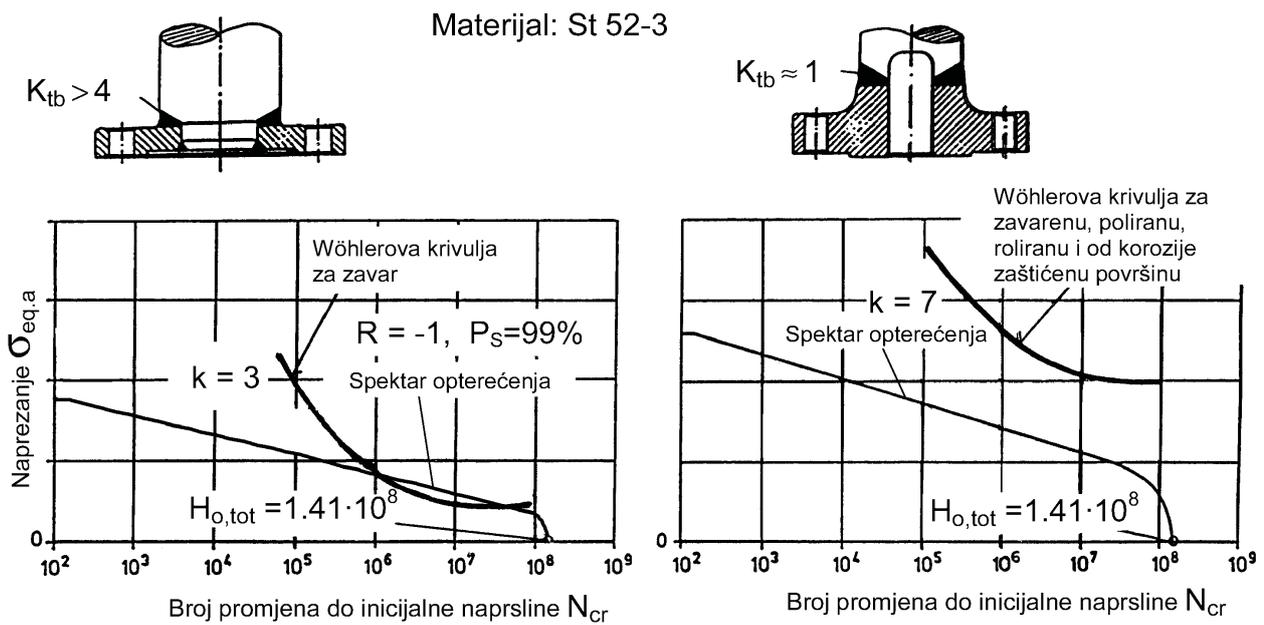
Slika 5.3 Provjera pogonske čvrstoće komponenti zavješnja vozila.



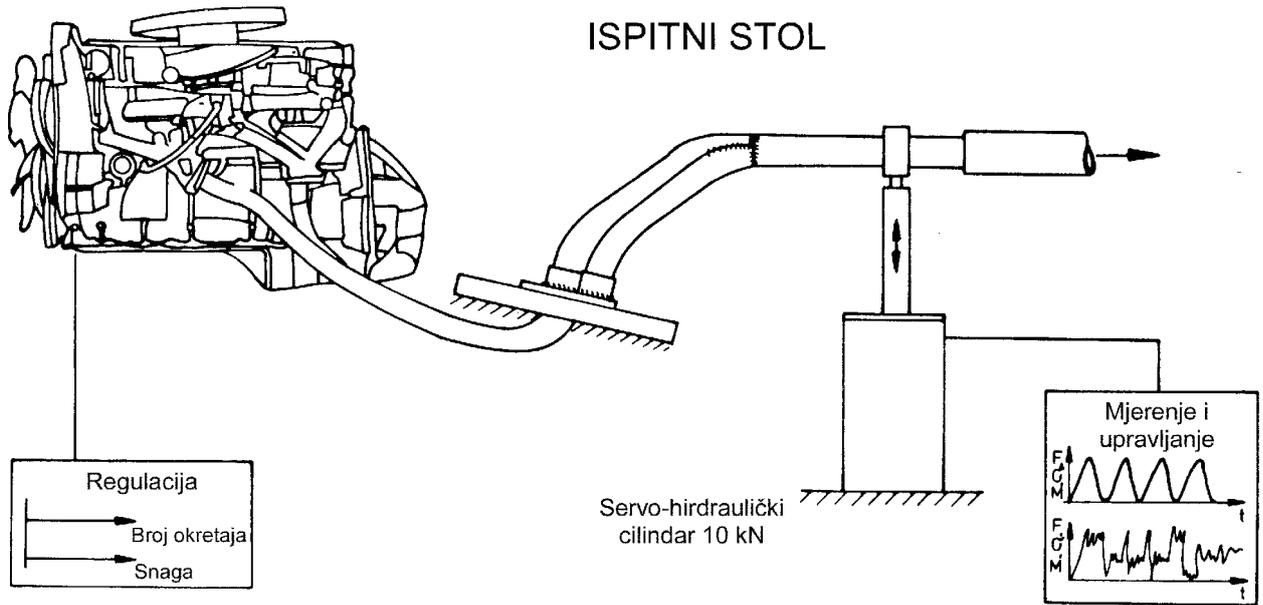
Slika 5.4 Mješalice kemijskih postrojenja.



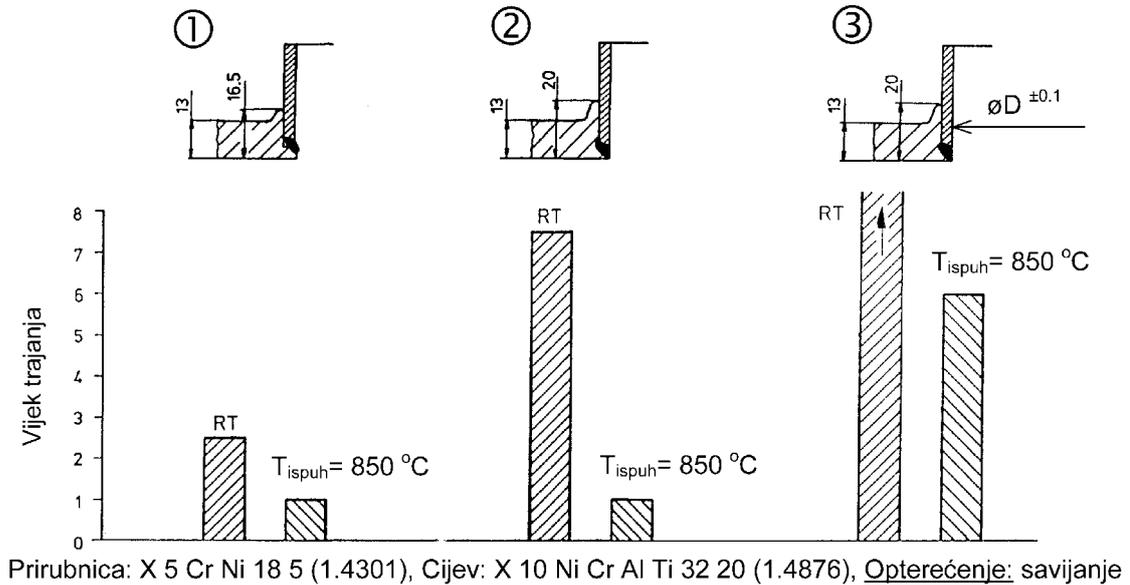
Slika 5.5 Osnovna i konačna izvedba spojke.



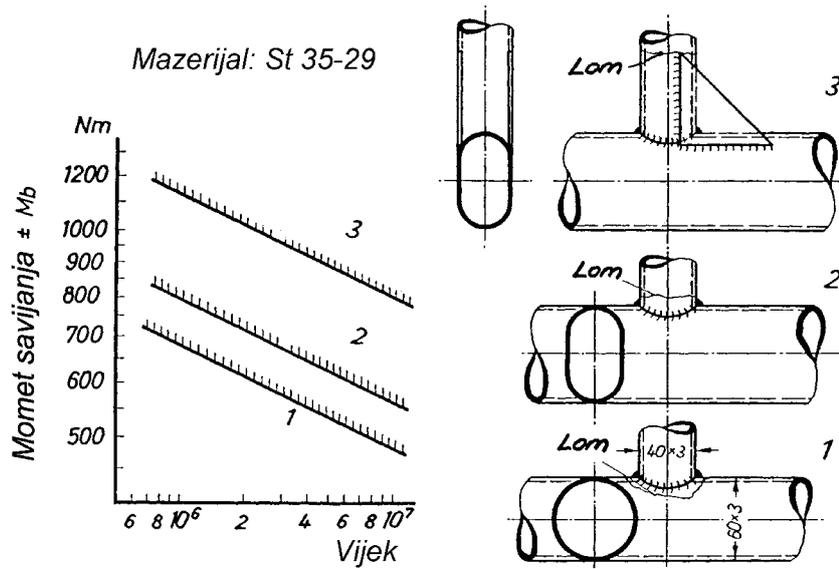
Slika 5.6 Spektar pogonskog opterećenja i Wöhlerove krivulje za osnovnu i konačnu izvedbu.



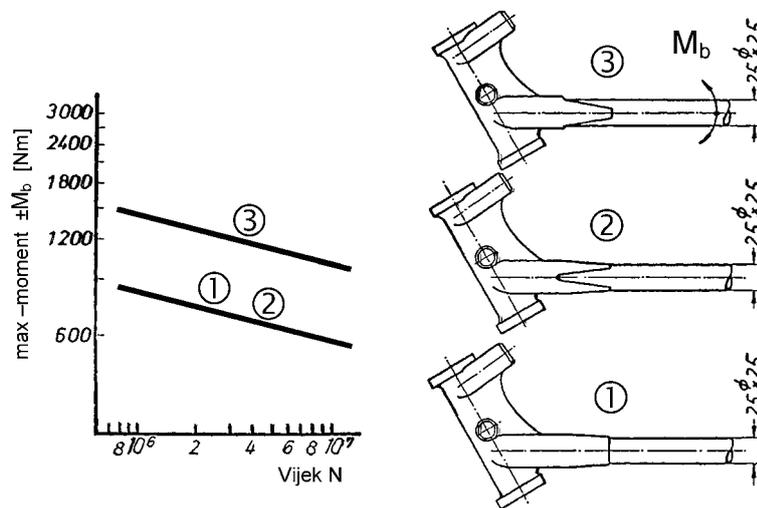
Slika 5.7 Ispitni stol za određivanje pogonske čvrstoće.



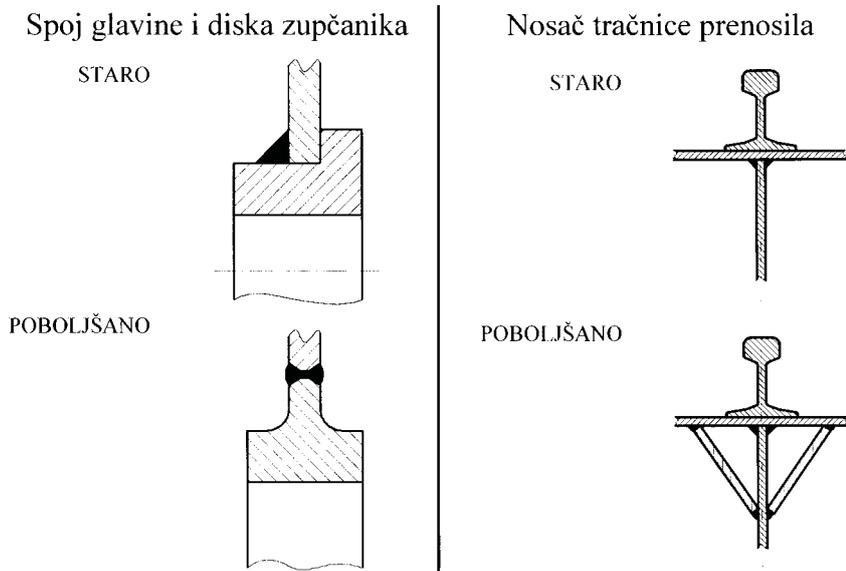
Slika 5.8 Ovisnost vijeka trajanja o izvedbi prirubnice kod sobne i povišene temperature.



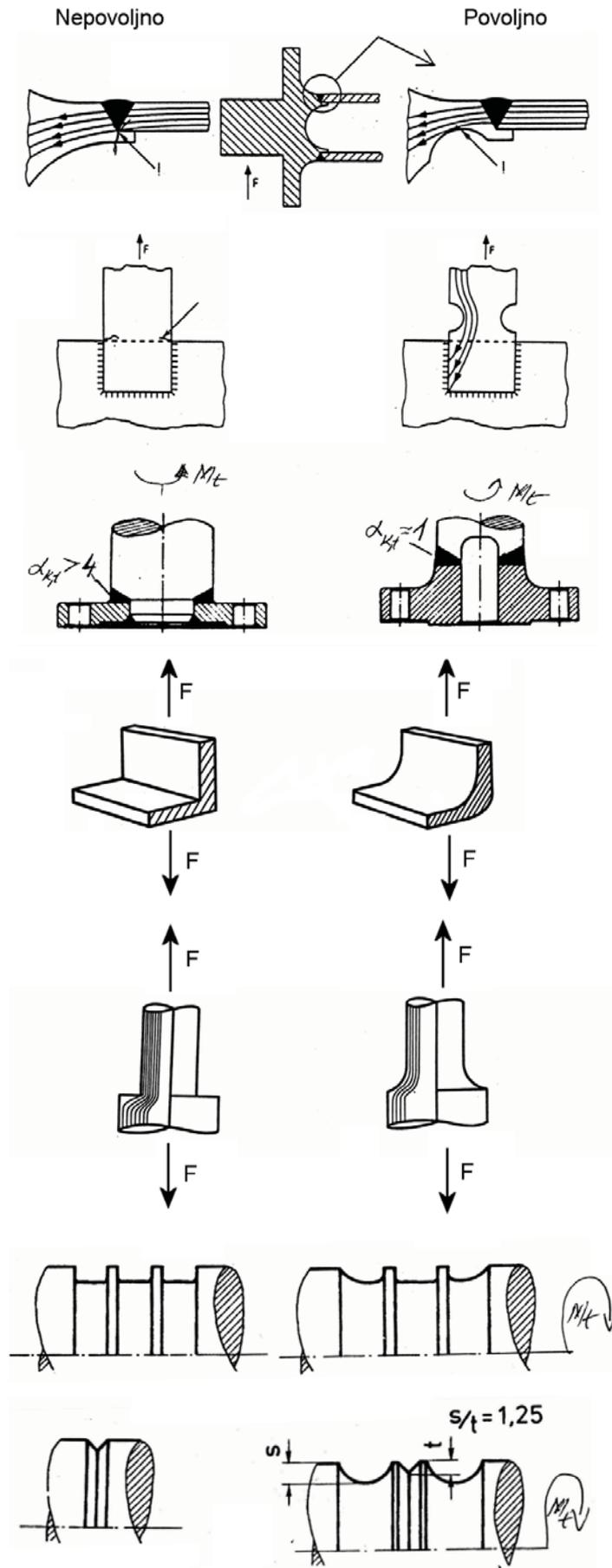
Slika 5.9 Pogonska čvrstoća zavarenog spoja.



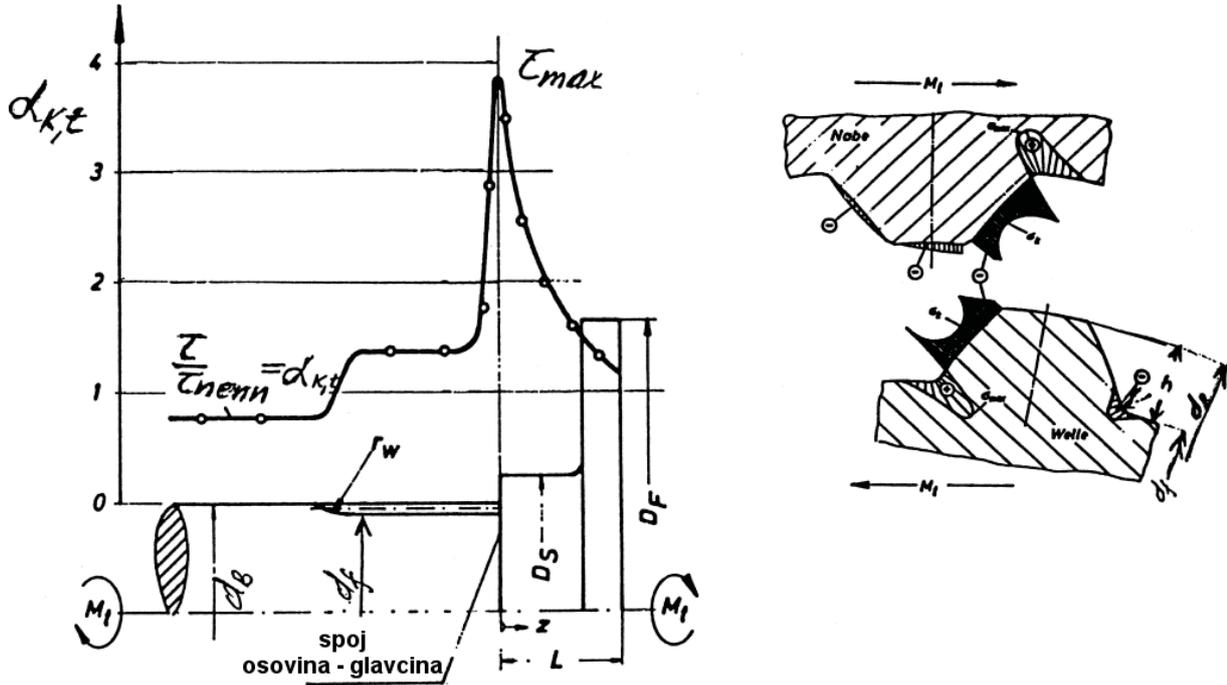
Slika 5.10 Pogonska čvrstoća glave okvira (materijal St 55-29).



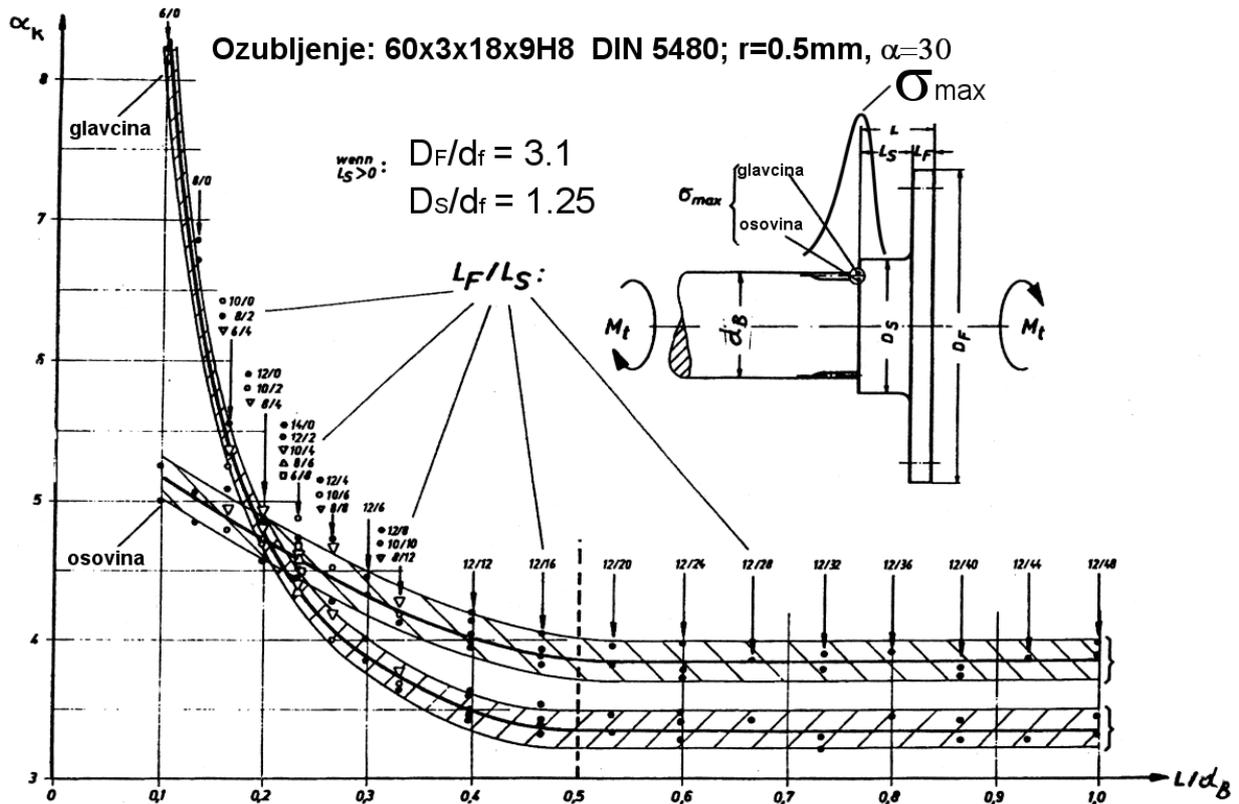
Slika 5.11 Poboljšanja konstrukcije.



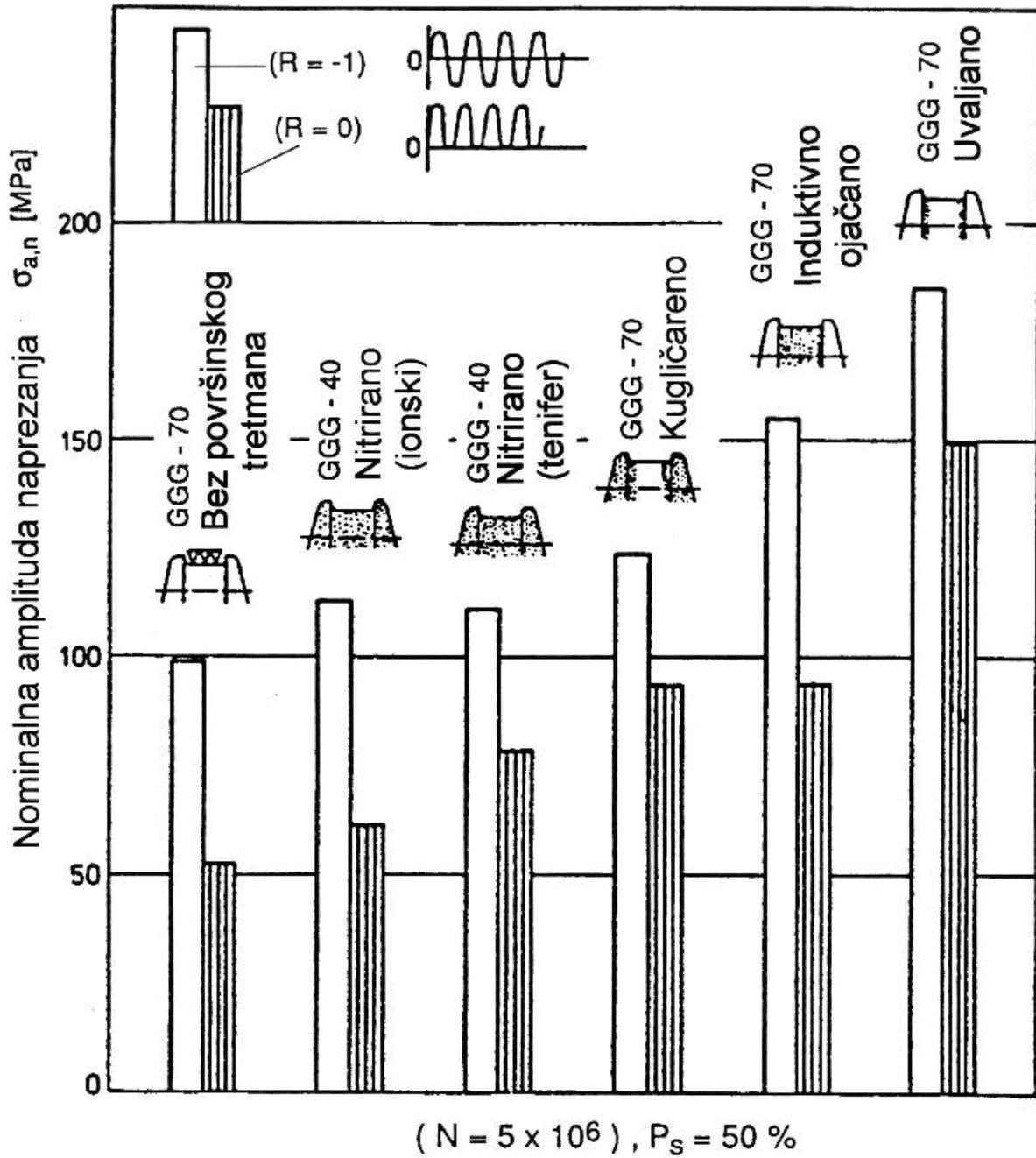
Slika 5.12 Poboljšanja konstrukcije.



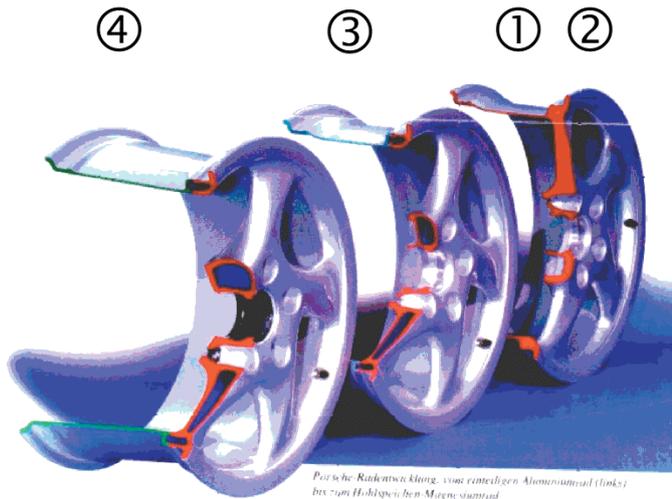
Slika 5.13 Tipična raspodjele konc. naprezanja  $\alpha_{k,t}$  na spoju nazubljene osovine i glavčine.



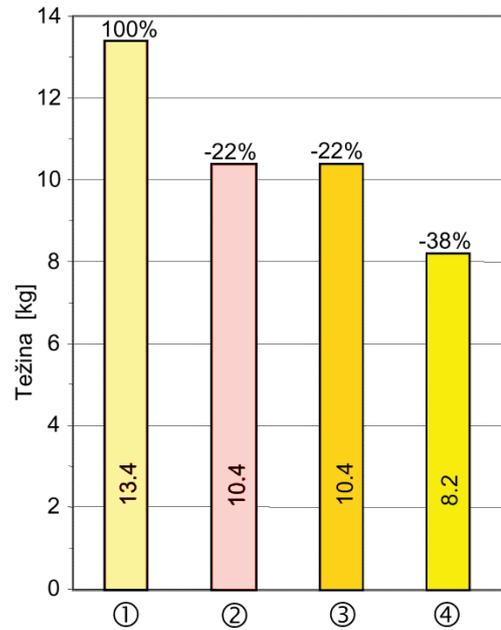
Slika 5.14 Ovisnost konc. naprezanja o dimenzijama osovine i glavčine.



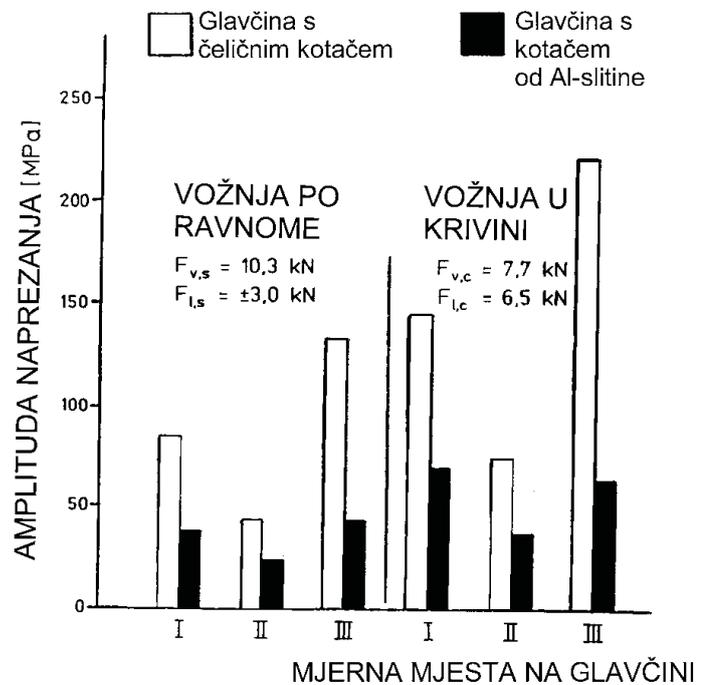
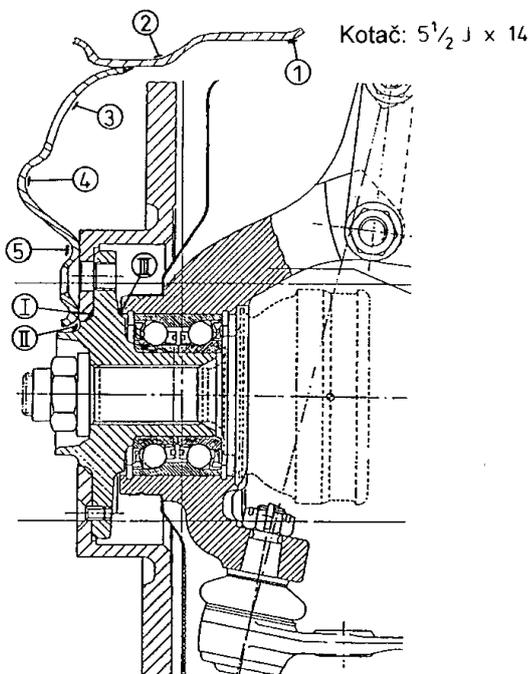
Slika 5.15 Utjecaj površinske obrade i materijala na trajnu čvrstoću koljenastog vratila.



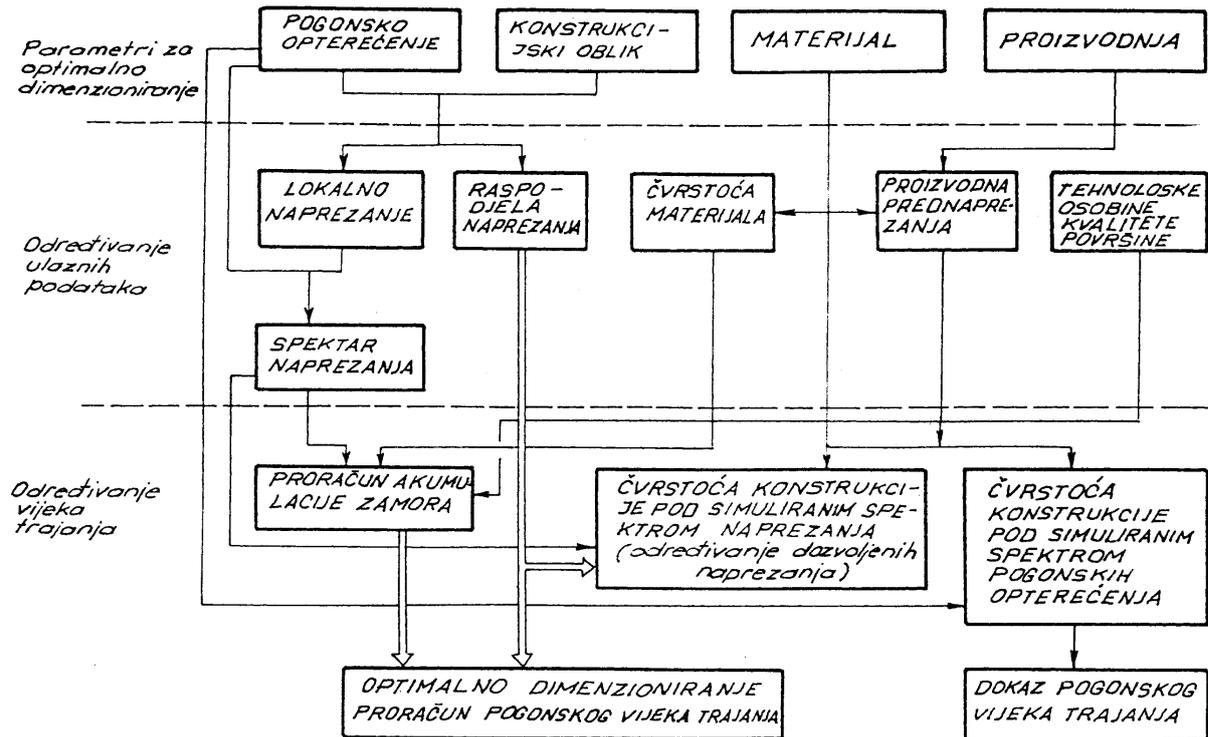
- ① Al-kotač, jednodijelni
- ② Mg-kotač, jednodijelni
- ③ Al-kotač, dvodijelni
- ④ Mg-kotač, dvodijelni



Slika 5.16 Porsche kotači od Al i Mg slitina.



Slika 5.17 Utjecaj kotača na naprezanja glavčine.



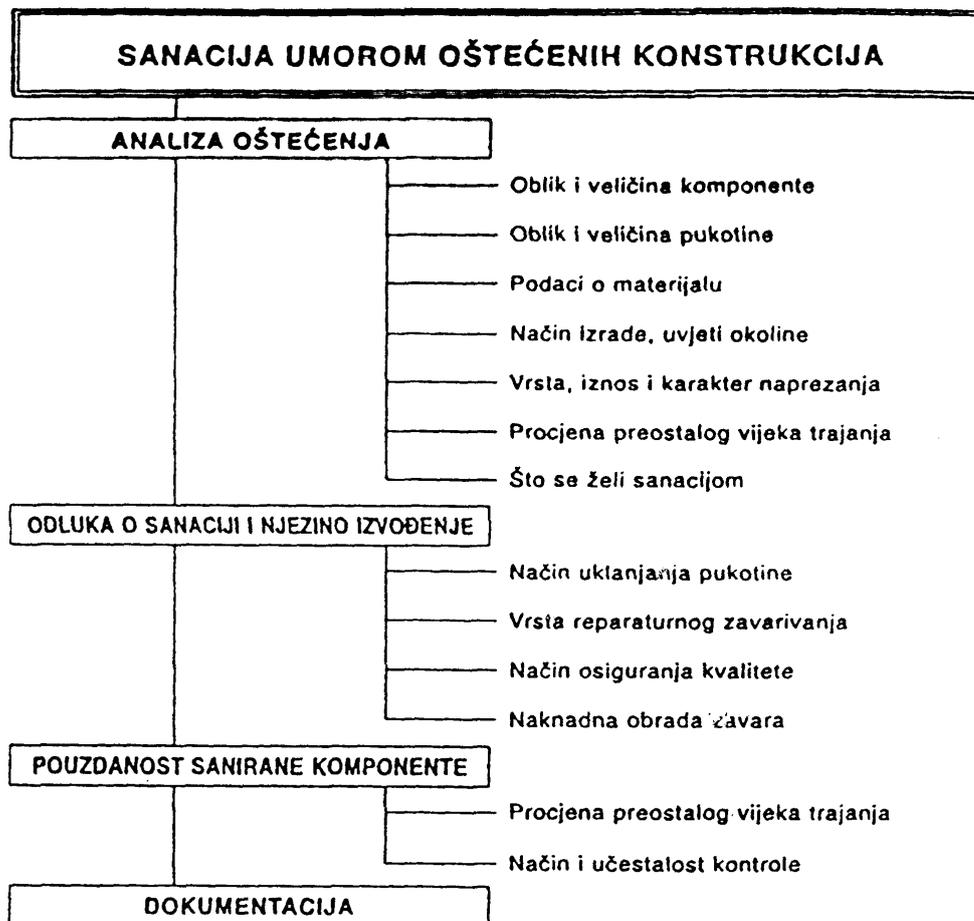
Slika 5.18 Metodika optimalnog dimenzioniranja konstrukcija.

*Prema postojećoj definiciji "je onaj proizvod neispravan koji pri namjenskoj upotrebi ne osigurava traženo djelovanje na temelju svih uvjeta i saznanja u vrijeme kada je on stavljen u upotrebu".*

*Da bi se izbjegli lomovi treba voditi računa o utjecaju*

- pogonskog opterećenja*
- oblikovanje uključivo dimenzioniranje*
- materijalu*
- procesu izrade*

## 6. Uvjeti i metode za saniranje zamorom oštećenih konstrukcija.



Slika 6.1 Procedura sanacije zamornih oštećenja.

METODIKA SANACIJE1. Analiza oštećenja

u kojoj su navedeni svi podaci o vrsti oštećenja, upotrebi, okolnim uvjetima i vijeku trajanja

2. Analiza opterećenja

u kojoj se provjeravaju podaci o konstrukciji, materijalu i tehnologiji izrade da bi se odredio "faktor strukturnog naprezanja" na mjestu oštećenja.

3. Odluka o postupku sanacije

pri kojoj se na temelju postojećih podataka vrši procjena novog "faktora strukturnog naprezanja". Time se vrši provjera pogonske čvrstoće sanirane konstrukcije koja vrijedi kao dokument kojim se regulira odgovornost projektanta i izvođača

4. Izvođenje sanacije

uz kontrolu odgovornog stručnjaka koji mora izraditi dokumentaciju o kvaliteti izvedene sanacije

5. Konačna provjera, ocjena pouzdanosti i trajnosti sanirane konstrukcije

Određivanje potrebnih inspekcija - njenog oblika, opsega i intervala

Taj dokument regulira pored odgovornosti projektanta i izvođača također i odgovornost korisnika.

Što je viša opasnost udesa i teže posljedice za korisnika i okolni svijet tim je manji utjecaj veličine troškova koji nastaju pri izvođenju odgovarajuće sanacije. Pri tome se mora voditi računa o slijedećim osnovnim zahtjevima:

- A.) Koje je stanje nauke i tehnike da bi se ispunili postavljeni zahtjevi
- B.) Koje obaveze mora ispuniti odgovorno upravno osoblje
- C.) Tko je odgovoran za ispravnost izvedbe pojedinih radova
- D.) Koje se mjere moraju poduzeti da se odgovornost za sigurnost smanji na najmanju moguću mjeru.

SANACIJA SIGURNOSNIH OBJEKATA  
TREBAJU IZVODITI PROVJERENE  
CERTIFICIRANE FIRME I INSTITUCIJE  
KOJE ISPUNJAVAJU ZAHTEJEVE  
PREMA ISO 9001 do 9004 I  
IMAJU ODGOVARAJUĆE ZNANJE  
I ISKUSTVO

ISO 9001 do 9004 sadrže slijedeće osnovne točke:

1) Općeniti pristup osiguranju kvalitete izvedbe u kojem su sadržani svi pojedini elementi postupka

2) Provjera plana saniranja u kojem se vodi računa o zahtjevima naručioaca, mogućnostima izvedbe, riziku i zahtjevima za sigurnost

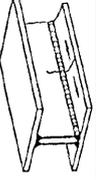
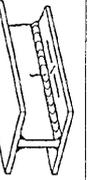
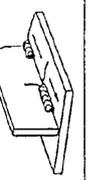
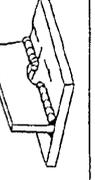
3) Vladanje kvalitetom u odnosu na postojeće znanje o materijalu i mogućnostima pripreme i izvedbe saniranja

4) Ispitivanje, pri čemu se određuje koje vrste ispitivanja su predviđene da bi se osigurao i provjerio kvalitet izvedbe uključujući sredstva za ispitivanje

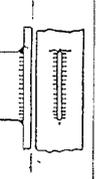
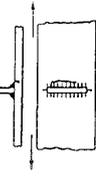
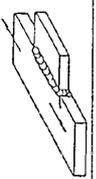
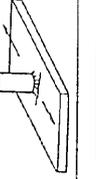
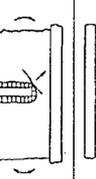
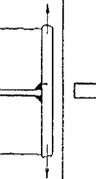
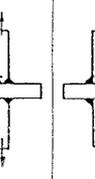
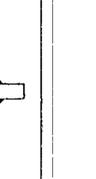
5) Dokumentaciju sa svim podacima o izvedbi koja služi kao dokazni materijal za provjeru

6) Izobrazbu osoblja uključenog u izvedbu ovisno u stupnju djelovanja i odgovornosti.

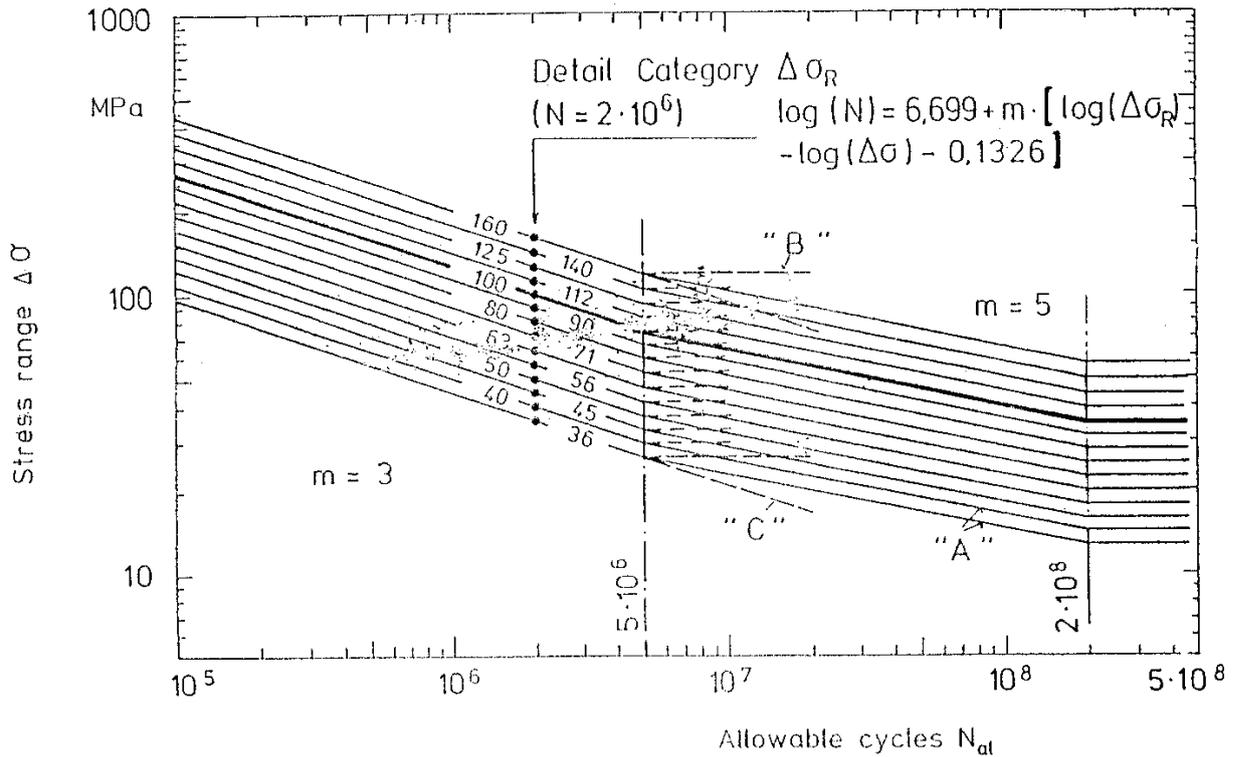
## 7. Primjena standarda i preporuka pri određivanju pogonske čvrstoće konstrukcija.

| Type/ No. | Joint configuration showing mode of fatigue cracking and stress considered            | Description of joint   | Detail category |
|-----------|---|--|-----------------|
| 1         |    | Transverse butt weld ground flush to plate, 100 % NDT (Non-Destructive testing)  | 125             |
| 2         |    | Transverse butt welds made in the shop in the flat position by any method except submerged arc welding, NDT                    | 100             |
| 3         |    | Transverse butt welds not satisfying conditions for joint No. 2, NDT   | 80              |
| 4         |    | Transverse butt weld on backing bar based on stress range in flat plate excluding effect of backing bar                        | 71              |
| 5         |    | Continuous automatic longitudinal butt weld without stop/start positions (based on stress range in flange adjacent to weld)    | 125             |
| 6         |    | Continuous automatic longitudinal fillet weld without stop/start positions (based on stress range in flange adjacent to weld)  | 112             |
| 7         |    | Continuous manual longitudinal fillet or butt weld (based on stress range in flange adjacent to weld)                          | 100             |
| 8         |  | Intermittent longitudinal fillet weld (based on stress range in flange at weld ends)   | 80              |
| 9         |  | Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent fillet weld with cope holes (based on stress range in flange at weld ends) | 71              |

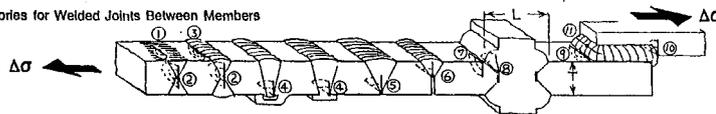
| Type/ No. | Joint configuration showing mode of fatigue cracking and stress considered           | Description of joint   | Detail category |
|-----------|--|--|-----------------|
| 10        |    | Longitudinal fillet welded gusset: shorter than 150 mm longer than 150 mm near the edge  | 71<br>63<br>50  |
| 11        |    | Transverse fillet welded gusset  | 80              |
| 12        |    | Gusset welded on plate edge  | 50              |
| 13        |    | Non-load-carrying shear connector  | 80              |
| 14        |    | Stiffener welded to girder web (based on principal stress range in web at end of stiffener)  | 80              |
| 15        |   | Stiffener welded to girder flange (based on stress range in flange at weld toe)  | 80              |
| 16        |  | Cruciform joint K-butt weld with fillet welded ends. Misalignment less than 15 % plate thickness                                       | 71              |
| 17        |  | Cruciform joint transverse fillet weld, toe failure. Misalignment less than 15 % plate thickness (root failure: see joint type No. 28) | 63              |

Slika 7.1 Examples for Detail Categories of Eurocode for Fatigue Design (primjer standarda za varene čelične konstrukcije – EUROCODE 3).



Slika 7.2 Design Curves of Eurocode for Welded Structures (konstrukcije – Wöhlerove krivulje po EUROCODE 3).

Table 5.1.3. Detail Categories for Welded Joints Between Members



Slide 3.2.29

DRAFT Page 42 prEN 1999 Part 2 : 1996 CEN/TC250/SC9/N89

| Product Forms                       |  | Rolled, extruded and forged products   |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      | Castings                                    |
|-------------------------------------|--|--|------------------------------------|-----------|--------------------|------------------|------------------------------------|----------|------------|----------------------|----------------------|---|
| Initiation sites                    | Reference No.  | 1, 2   | 3, 2                               | 4         | 5                  | 6                | 7                                  | 8        | 9, 10      | 11                   | as Types 3.1 to 3.10 |   |
|                                     | Locations  | surface or embedded discontinuity  | weld toe or embedded discontinuity | weld root | root discontinuity | unfused root     | weld toe                           | weld toe | weld root  | weld toe             |                      | weld root                                   |
| Stress orientation (see 4....)      |  | Normal to weld axis  |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
| Alloys                              |  | As tab 1.1.1   |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      | tab 1.1.2                                   |
| Particular Requirements             | Dimensional  | Joint type   | in-line butt                       |           |                    | Cruciform or Tee |                                    | Lap      |            |                      |                      | as Types 3.1 to 3.10                        |
|                                     |  | Weld type  | Butt                               |           |                    | Butt             |                                    | fillet   |            |                      |                      |   |
|                                     |  | Preparation  | Double sided                       |           | Single sided       |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
|                                     |  | Penetration  | Full                               |           | partial            |                  | full                               |          | partial    |                      |                      |   |
|                                     | Transition   | Taper slope ≤ 1 in 4 at width or thickness change                                    |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
|                                     | Manufacturing  | Root   | Ground                             | Backed    | Unbacked           | Ground           |                                    |          |            |                      |                      |   |
|                                     |  | Cap  | Ground flush                       |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
| Ends                                |  | Extension plates used on ends, cut off and ground flush in direction of Δσ           |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
| Inspection/Testing                  |  | As Annex D Table D.1   |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
| Quality Standard                    |  | As Annex D Table D.2   |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
| Stress Analysis                     | Stress parameter   | Net throat + specified misalignment stress (no overfill)                             |                                    |           |                    |                  | net section                        |          | net throat |                      | net throat           |   |
|                                     | Stress concentration effects included in Detail Category | Profile, unspecified misalignment and discontinuities permitted by Annex D Table D.2 |                                    |           |                    |                  |                                    |          |            |                      |                      |   |
| Type Number                         |  | 3.1  | 3.2                                | 3.3       | 3.4                | 3.5              | 3.6                                | 3.7      | 3.8        | 3.9                  | 3.10                 | 3.11–3.20                                   |
| Detail Category Δσ <sub>r</sub> - m | Flats, solid   | (55-6) 44-5  | (39-4) 35-4                        | (35-4)    | (29-3,2)           | )                | as Table 5.1.2(a) Types 2.1 to 2.9 |          | )          | as Types 3.8 and 3.7 | )                    | as Types 3.1 to 3.10 less 1 Detail Category |
|                                     | Open shapes  | (44-5) 28-4  | (35-4) 28-4                        | ) 25-3,2  | ) 18-3,2           | ) 14-3,2         |                                    |          | ) 18-3,2   | 3.7                  | ) 14-3,2             |   |
|                                     | Hollow   | NA   | NA                                 | )         | )                  | )                |                                    |          | )          |                      | )                    |   |

Key: NA = not applicable, → requirement continuous from left to right ( ) Before using values in brackets see 5.2.1(10)

Slika 7.3 Detail Categories for Welded Joints Between Members (primjer standarda za varene aluminijske konstrukcije EUROCODE 9).

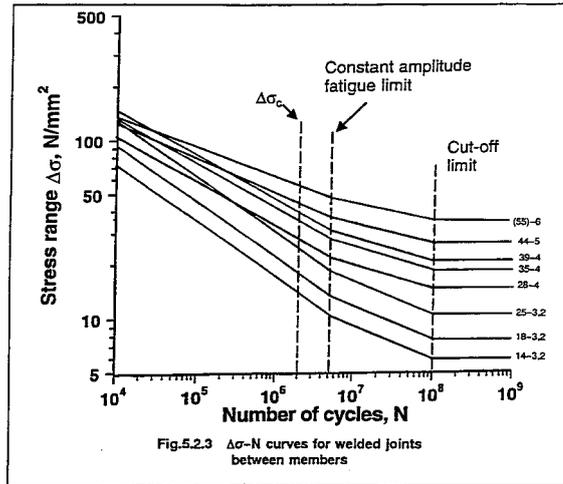


Table 5.2.3 Numerical values of  $\Delta\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>) for welded joints between members

| Detail Category ( $N_0 = 2 \times 10^6$ ) |       | $N = 10^5$     | $N_0 = 5 \times 10^5$ | $N_1 = 10^6$     |
|---|-------|----------------|-----------------------|------------------|
| $\Delta\sigma_c$                          | $m_1$ | $\Delta\sigma$ | $\Delta\sigma_0$      | $\Delta\sigma_1$ |
| (55)                                      | 6     | 90,6           | 47,2                  | 32,5             |
| 44  | 5     | 80,1           | 36,6                  | 23,9             |
| 39  | 4     | 82,5           | 31,0                  | 18,8             |
| 35  | 4     | 74,0           | 27,8                  | 16,8             |
| 28  | 4     | 59,2           | 22,3                  | 13,5             |
| 25  | 3,2   | 63,8           | 18,8                  | 10,6             |
| 18  | 3,2   | 45,9           | 13,5                  | 7,6              |
| 14  | 3,2   | 35,7           | 10,5                  | 5,9              |

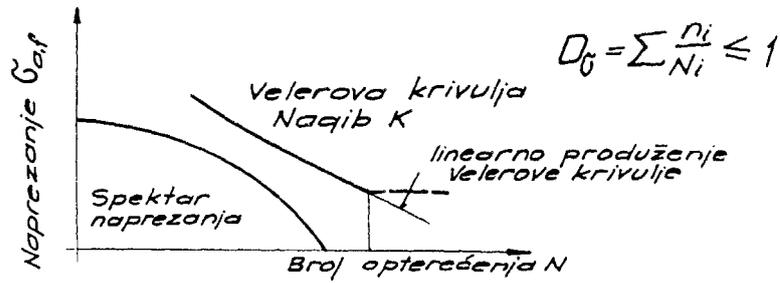
Slika 7.4 S-N Curves for members welded joints between members (konstrukcije – Wöhlerove krivulje po EUROCODE 9).

Table 5.2.7  $\Delta\sigma_c$  for hot spot stress assessment

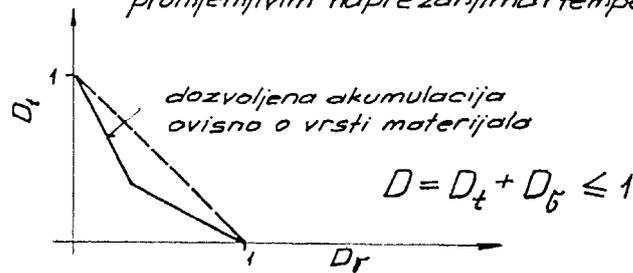
| Thickness of stressed member T (mm) | $\Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup> |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| $0 < T \leq 4$                      | 44                                 |
| $4 < T \leq 10$                     | 39                                 |
| $10 < T \leq 15$                    | 35                                 |
| $15 < T \leq 25$                    | 31                                 |
| $25 < T \leq 40$                    | 28                                 |
| $T > 40$                            | 25                                 |

Slika 7.5 Hot spot stress assesment of welded toes (dozvoljeno žarišno naprezanje po EUROCODE 9).

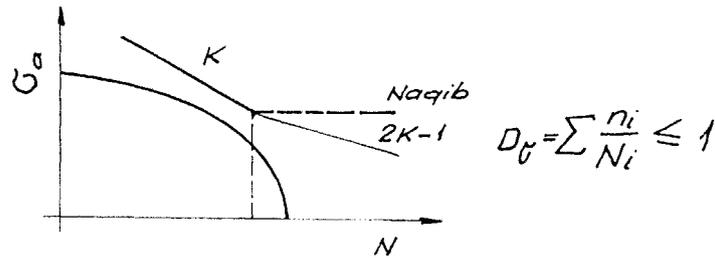
1. ASME - Code III odnosno VIII



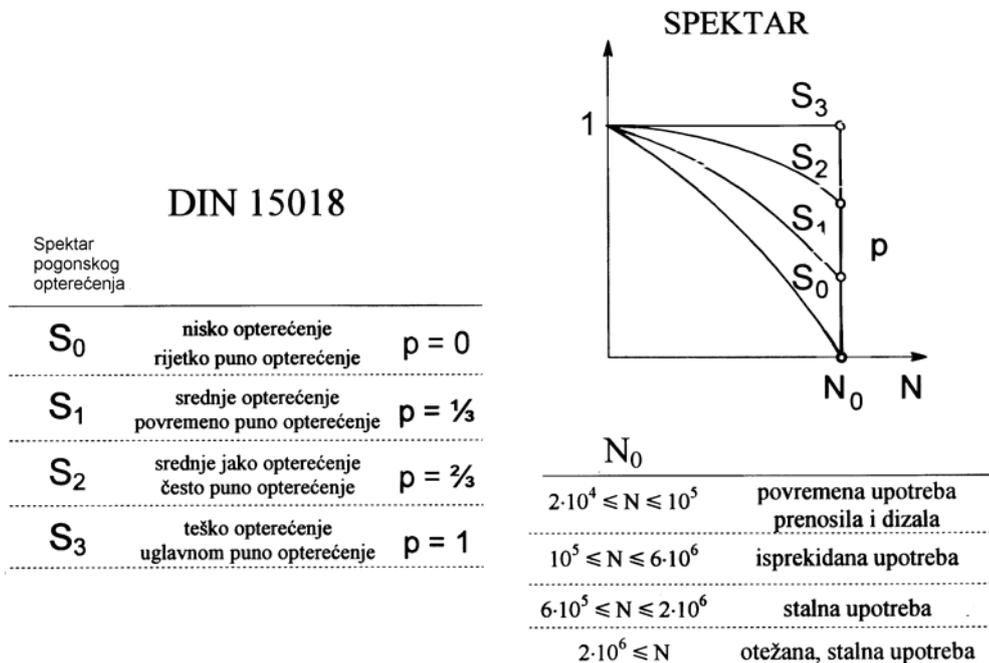
Dopuna Code III kod kombiniranog opterećenja promjenljivim naprežanjima i temperaturama



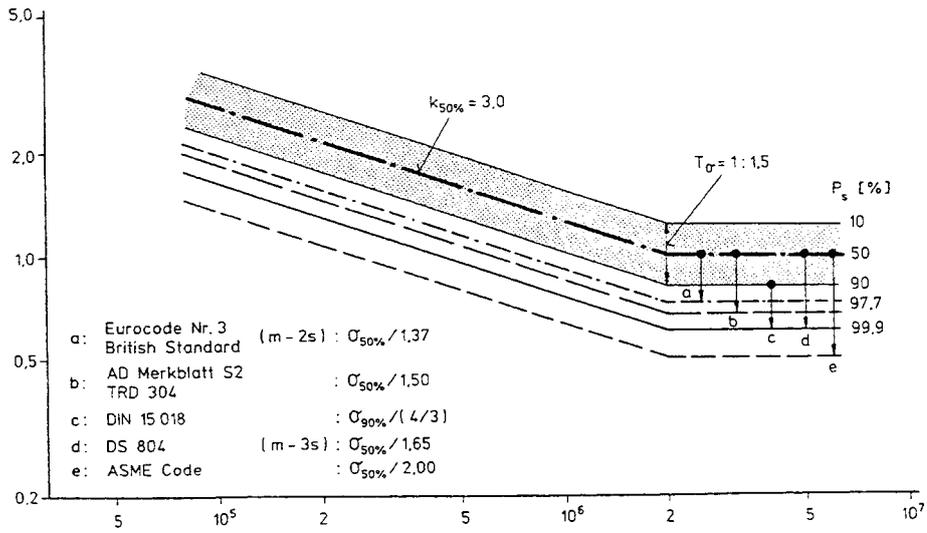
- 2. TRD 304 kao ASME - Code
- 3. AD - S2



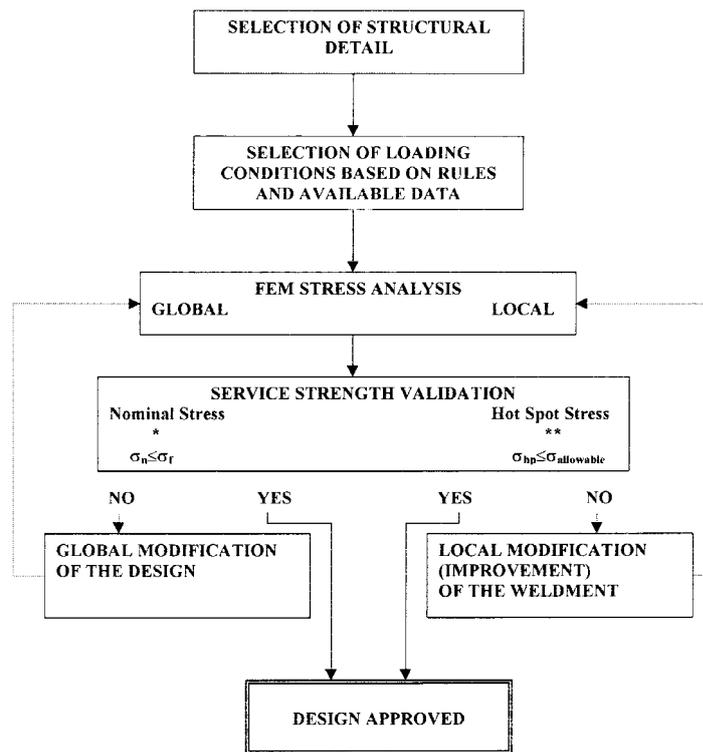
Slika 7.6 Propisi i preporuke za dokaz pogonske čvrstoće na području proizvodnih i energetskih postrojenja.



Slika 7.7 Standardizirani spektri pogonskog opterećenja prema DIN 15018.



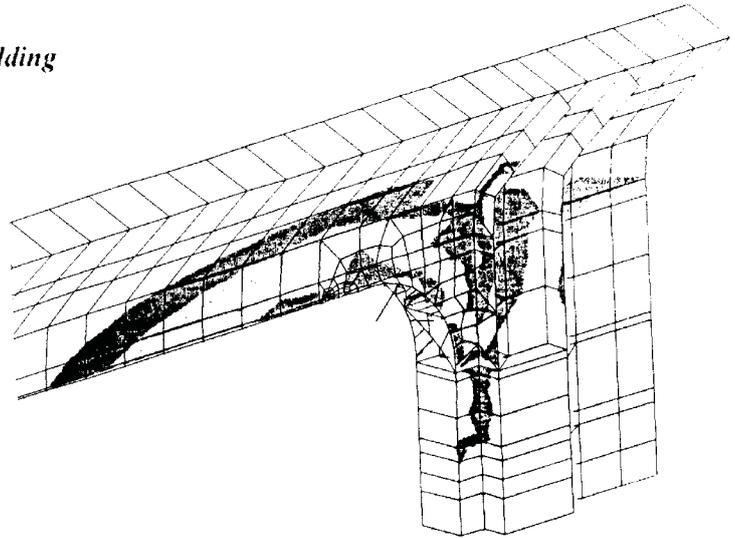
Slika 7.8 Koeficijent sigurnosti prema različitim standardima.



\*)  $\sigma_r$ : Structural Yield Point (or Requirement by Rules)

\*\*)  $\sigma_{allowable}$ : Depend on service stress spectrum and fatigue strength or data given by Rules

Slika 7.9 Procedure for Assessment of the Service Strength of Railway Coaches.

**FATIGUE EVALUATION***Critical Area – Door upper corner butt welding**Material AlMgSiMn**Alloy (EN AW – 6106)**Treatment T6**MIG – Welding**Filler Material: AlSi5 (EN AW 4043)**Base Material:  $R_m \geq 250$  MPa,  $R_{p,0.2} \geq 200$  MPa**Weld :  $R_m \geq 160$  MPa,  $R_{p,0.2} \geq 120$  MPa**Loading based on standard UIC 566 (DIN EN 12663)*

$$F_{\max} = 1,2 \cdot M_{\max} \cdot g ; \quad F_{\min} = 0,8 M_{\max} \cdot g$$

$$F_{\text{avn}} = \pm 0,2 \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}$$

$$M_{\max} = m_1 + m_2$$

 *$m_1$  = Tare coach Weight* *$m_2$  = Payload (Sitting + standing passengers)**Slika 7.10 Fatigue Evaluation.*

1. Evaluation based on standards (UIC 566, EN 12 663)

$$\sigma_{\max} \hat{=} F_{\max}$$

$$\sigma_{\min} \hat{=} F_{\min} = \frac{0,8}{1,2} F_{\max} = 0,67 \sigma_{\max}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0,67$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 0,33 \sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_{\text{allowable}}$$

$$\Delta\sigma_{\text{allowable}} = \Delta\sigma_{10^7} \quad \text{for the Detail Category from Eurocode 9}$$

Based on the Data Table 4.49 the Detail Category to be chosen for this butt weld could be: 35-4 or 25-3.2

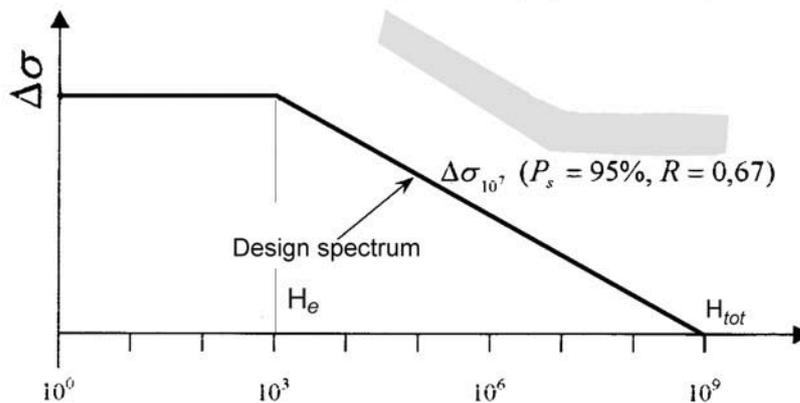
$$\Delta\sigma_{\text{allowable}} \text{ extrapolated to } 10^7 \text{ cycles} = 23 \text{ MPa}$$

Test Results with Door – Specimens delivered following results:

$$\Delta\sigma_{\text{allowable}} (N = 10^7, P_s = 95\%, R = 0,67) = 32 \text{ MPa}$$

2. Fatigue Evaluation based on estimated operational stress spectrum

Requirement: Usage 5-10<sup>6</sup> km in 20 Years corresponding to a total number of cycles 10<sup>9</sup> (≈ 200 cycles/km) with linear distribution and probability of occurrence for maximum values 1:10<sup>6</sup>.



$$\text{Allowable maximum operational stress: } \Delta\bar{\sigma}_{\text{op,all}} \approx 1,3 \Delta\sigma_{10^7} \cong 40 \text{ MPa}$$

Slika 7.11 Evaluation based on standards (UIC 566, EN 12 663).

**Procjena pogonske čvrstoće vagona brze željeznice  
proizvedenog iz zavarenih Al – profila AISi1MgMn.**

Osnovni materijal:  $R_m \geq 315$  MPa  
 $R_{p,0.2} \geq 280$  MPa

Var:  $R_m \geq 185$  MPa  
 $R_{p,0.2} \geq 115$  MPa

Zahtjevi prema normi:

$$\sigma_{\max} \triangleq F_{\max} = 1.2\sigma_{\text{stat}} / \sigma_{\min} = 0.8 \cdot \sigma_{\text{stat}}$$

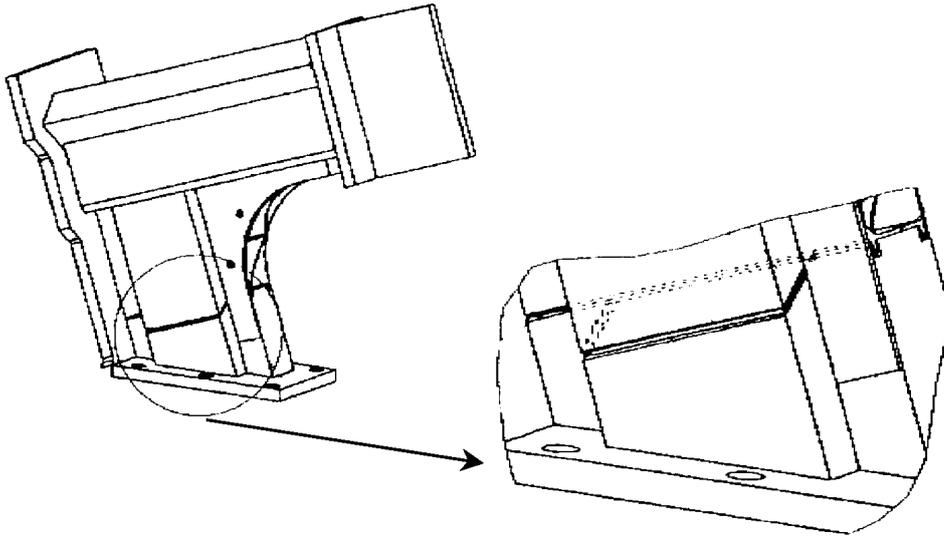
$$R = \frac{0.8}{1.2} = 0.67 \Rightarrow \text{Provjera čvrstoće pri promjenjivom opterećenju}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

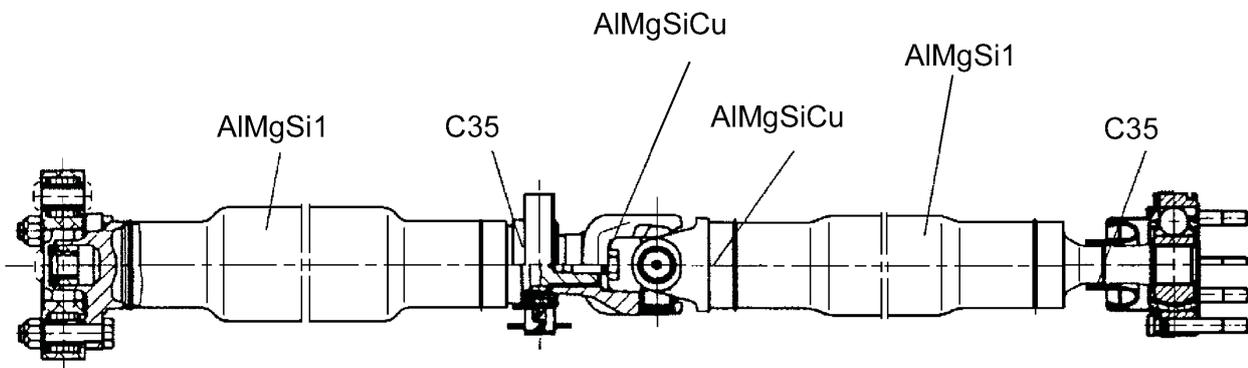
$$N \geq 10^7, \text{ bez naprsline uz } P_p = 90\%$$

Primjer:  $\sigma_{\max} = 60$  MPa;  $\sigma_{\min} = 40$  MPa  
 $\Delta\sigma = 20$  MPa  $\Rightarrow$  provjera po standardu

Slika 7.12 Procjena pogonske čvrstoće vagona brze željeznice proizvedenog iz zavarenih Al - profila.



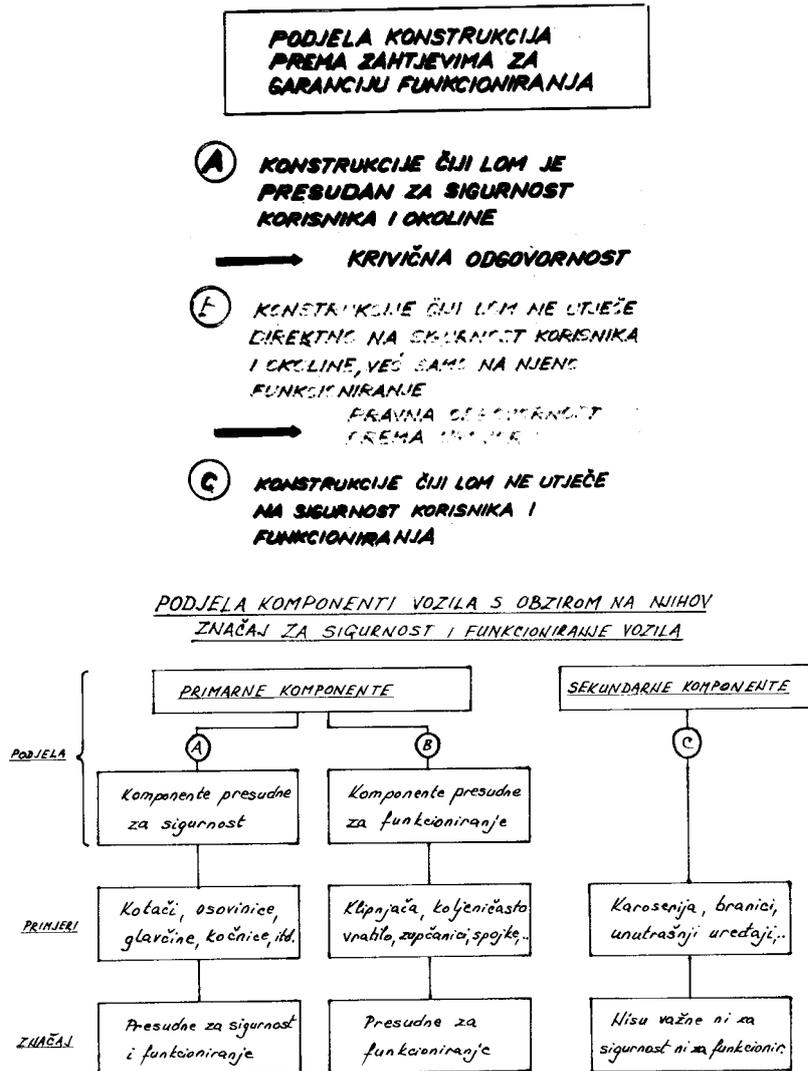
Slika 7.13 Detalj vrata željezničkog vagona - uzorak za provjeru pogonske čvrstoće.



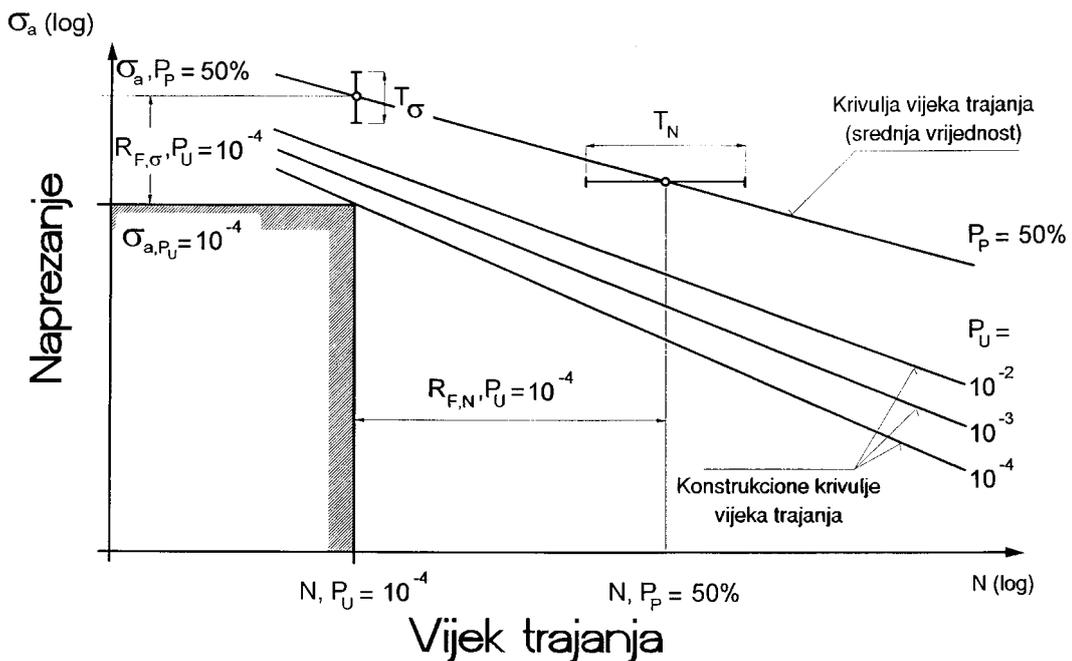
| Material                | AIMgSi1  | AIMgSiCu | AIMg2.7Mn1 | Čelik      |
|-------------------------|----------|----------|------------|------------|
| Dimenzije cijevi [mm]   | Ø 60 x 3 | Ø 60 x 3 | Ø 60 x 3.5 | Ø 60 x 1.5 |
| Cu [%]                  | <0.10    | 0.7-1.1  | <0.10      | -          |
| Mg [%]                  | 0.8-1.2  | 0.8-1.2  | 2.7-3.0    | -          |
| Mn [%]                  | 0.2-0.8  | 0.2-0.8  | 0.7-0.9    | 1.20-1.40  |
| Si [%]                  | 0.6-1.0  | 0.6-1.0  | ≤0.25      | 0.15-0.30  |
| Rm [MPa]                | 280-320  | 340-400  | 290-330    | 780-850    |
| R <sub>p0.2</sub> [MPa] | 270-310  | 330-380  | 245-285    | 670-750    |
| A [%]                   | >8       | >8       | >6         | >10        |

Slika 7.14 BMW - kardansko vratilo od lakih slitina.

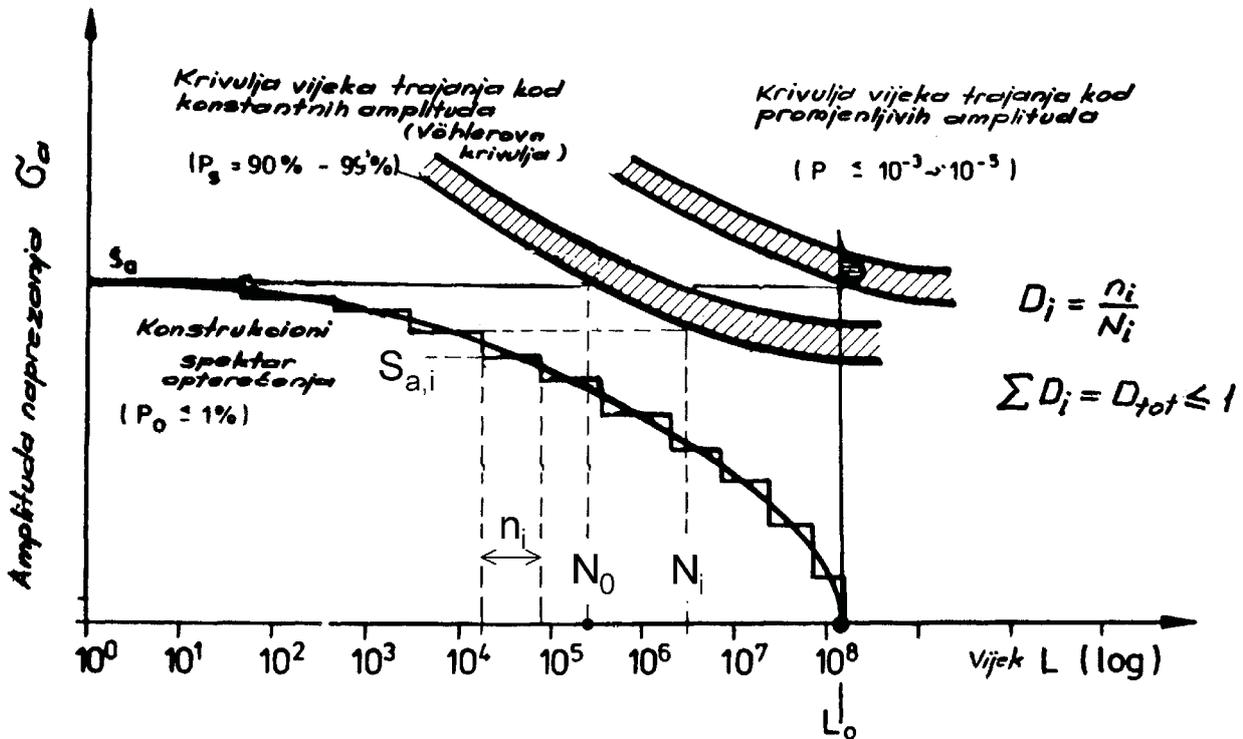
Smanjenje težine prema čeliku 15%, povećanje cijene prema čeliku 10%



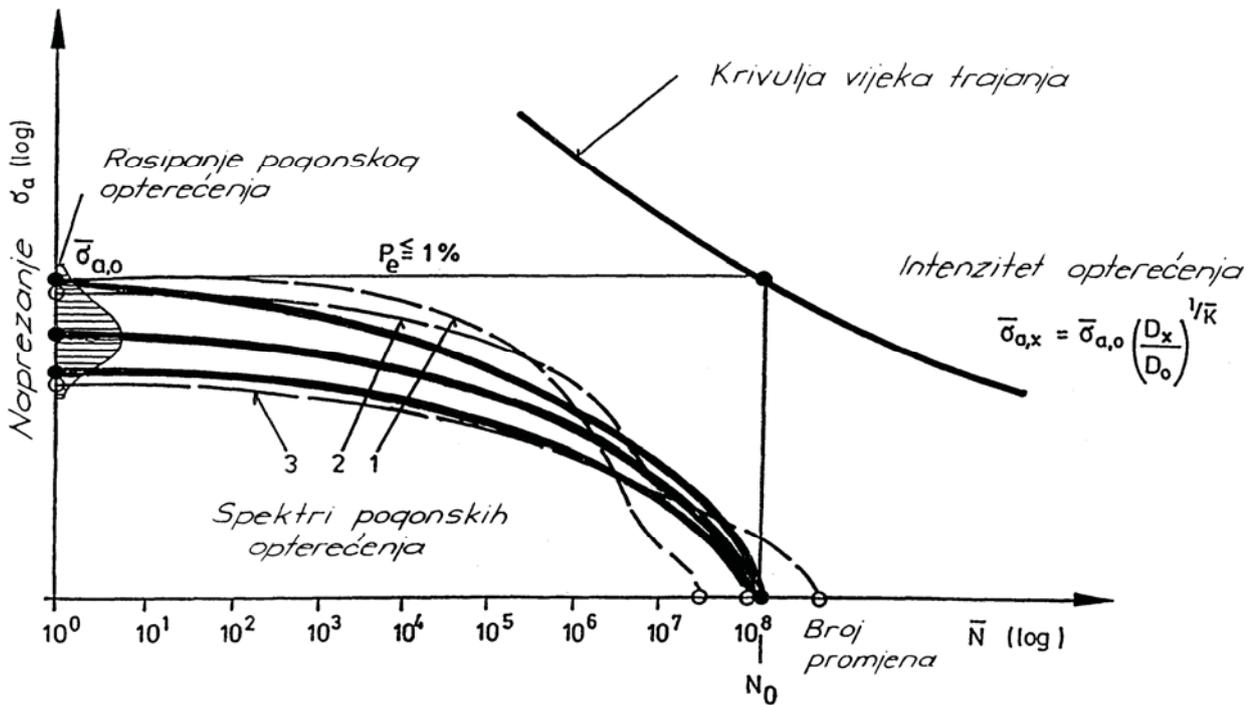
Slika 7.15 Podjela komponenti vozila obzirom na njihov značaj za sigurnost i funkcioniranje vozila.



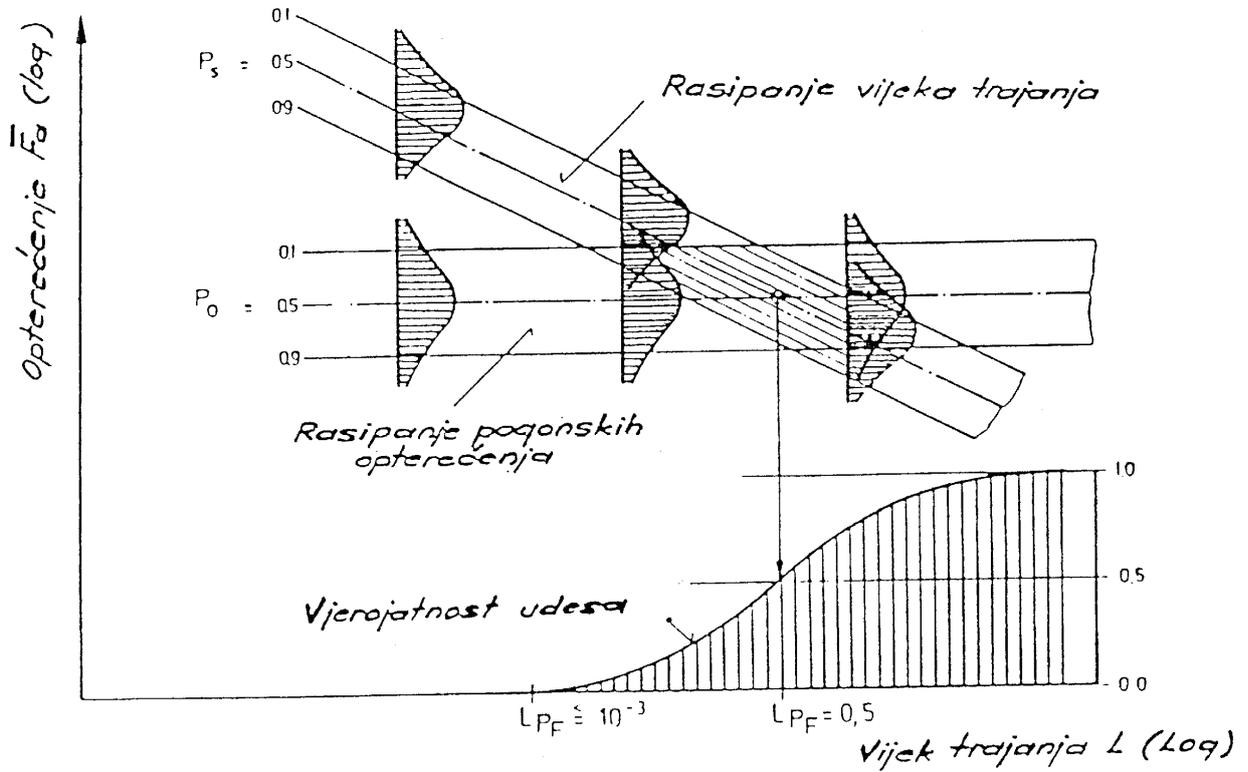
Slika 7.16 Vjerojatnost udesa i krivulje vijeka trajanja.



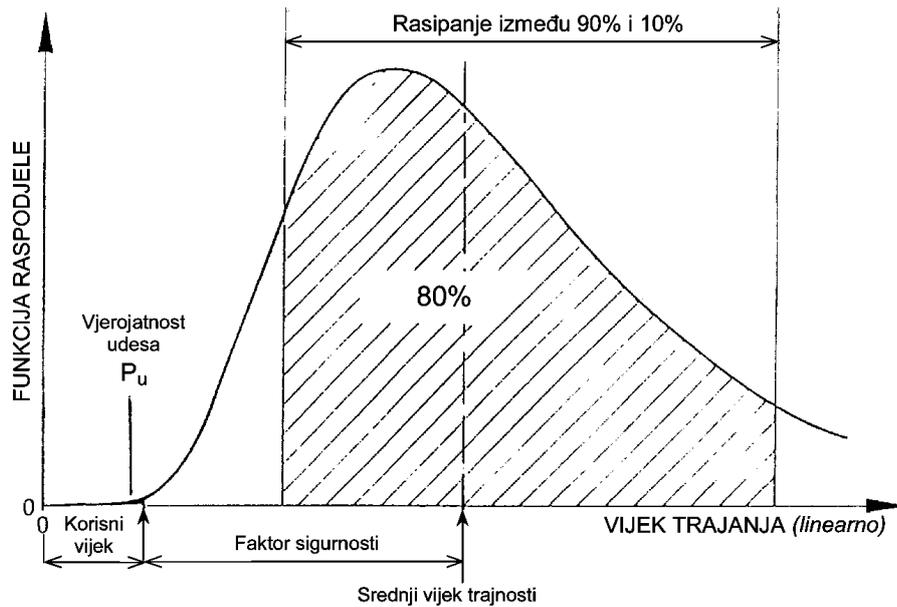
Slika 7.17 Procedura proračuna vijeka trajanja.



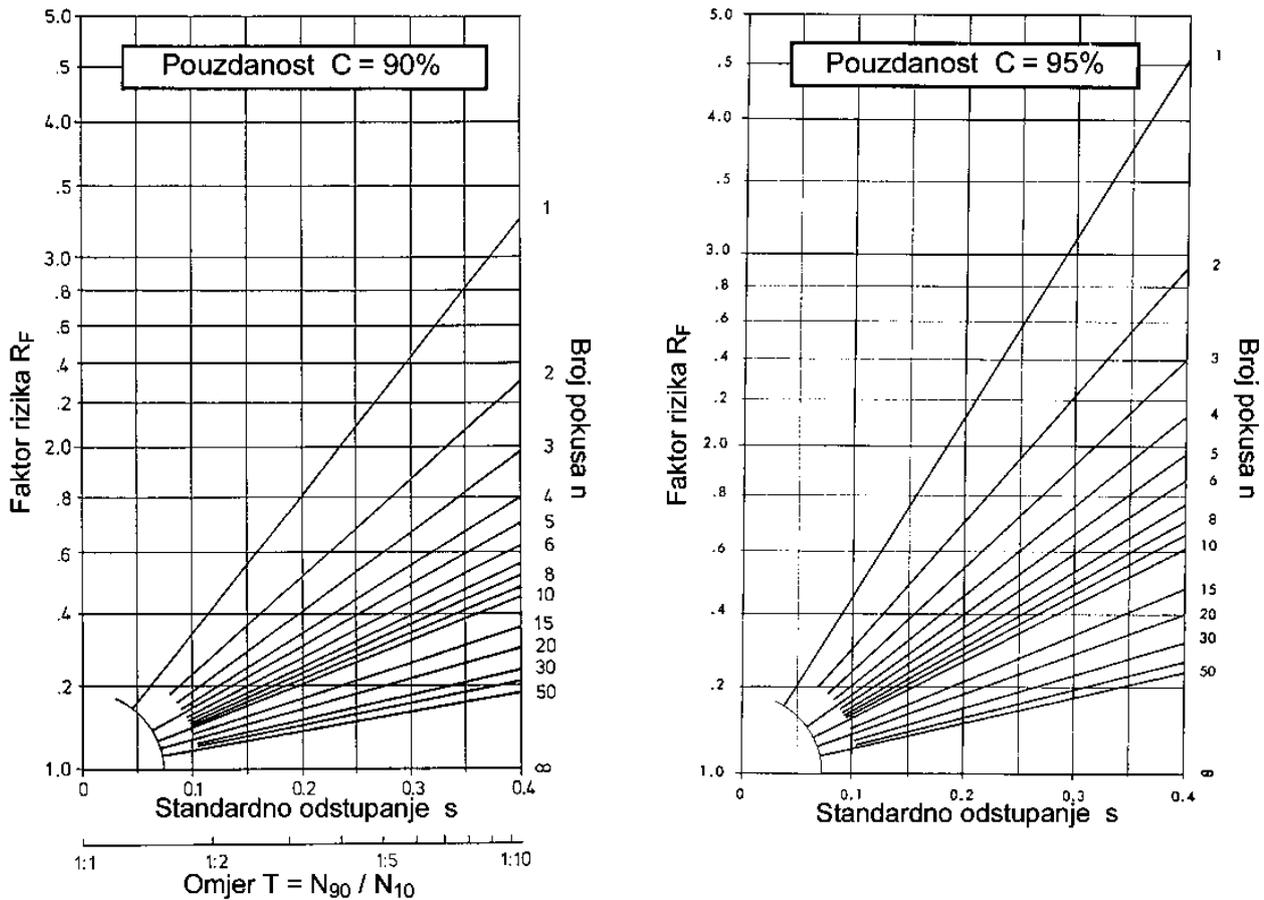
Slika 7.18 Definicija rasipanja pogonskog opterećenja.



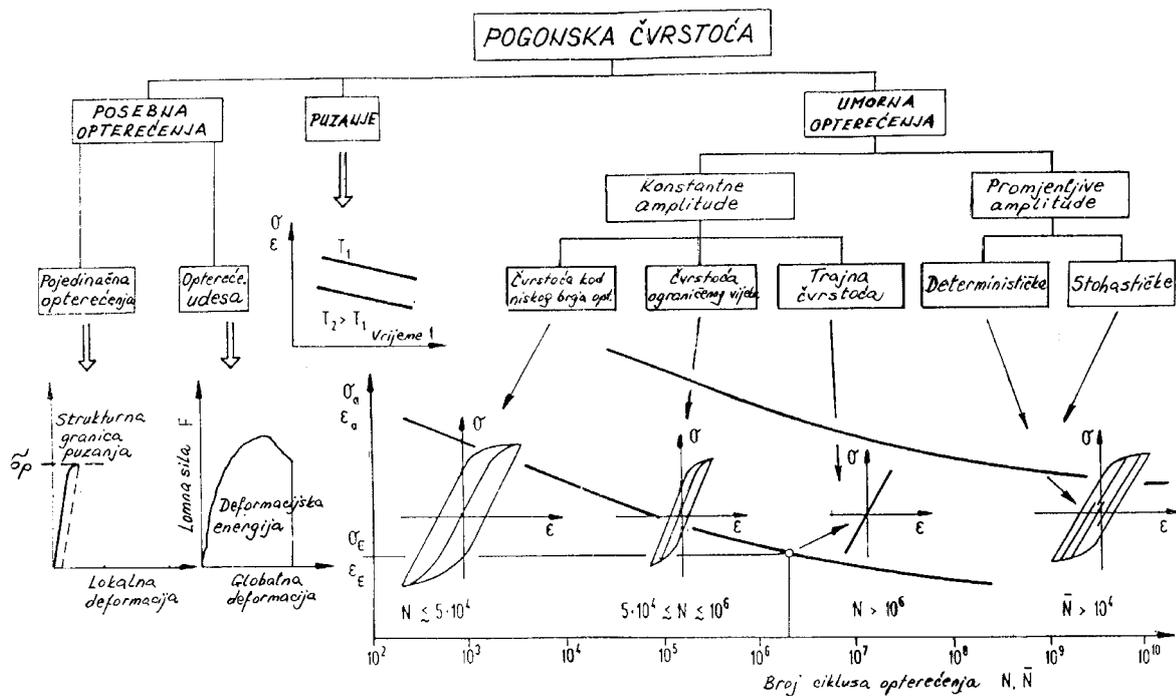
Slika 7.19 Vjerojatnost udesa i vijek trajanja.



Slika 7.20 Rasipanje vijeka trajanja.



Slika 7.21 Faktor rizika procjene srednje vrijednosti.



Slika 7.22 Sistematika pogonske čvrstoće.

## ISPITNA PITANJA

### A) POGONSKA OPTEREĆENJA

1. Izvori i podjela pogonskih opterećenja.
2. Upliv pogonskog opterećenja na vijek trajanja.
3. Jednparametarske metode brojanja opterećenja.
4. Dvoparametarske metode brojanja opterećenja.
5. Parametri spektra pogonskog opterećenja.

### B) PONAŠANJE MATERIJALA

1. Statistička obrada rezultata ispitivanja.
2. Wöhlerova krivulja – Gassnerova krivulja (krivulja vijeka trajanja).
3. Dijagram naprezanja i deformacija pri cikličkom opterećenju.
4. Opis ponašanja materijala pri cikličkom opterećenju.
5. Wöhlerova krivulja pri kontroliranim deformacijama.
6. Parametri mehanike loma.
7. Kriterij loma i vijek trajanja.

### C) METODE PROCJENE VIJEKA TRAJANA

1. Metodika i postupak za optimalno dimenzioniranje konstrukcija.
2. Kriterij optimalnog dimenzioniranja.
3. Procedura proračuna vijeka trajanja.
4. Miner-Palmgrenova metoda akumulacije oštećenja.
5. Relativna Minerova metoda proračuna.
6. Proračun vijeka trajanja po lokalnim deformacijama (podaci potrebni za postupak).
7. Proračun vijeka trajanja po lokalnim naprezanjima (podaci potrebni za postupak).

### D) UPLIVI NA POGONSKU ČVRSTOĆU

1. Upliv koncentracije naprezanja na pogonsku čvrstoću.
2. Upliv srednjeg naprezanja na pogonsku čvrstoću.
3. Upliv tehnološke obrade na vijek trajanja.
4. Upliv konstrukcijskog oblikovanja na vijek trajanja.
5. Upliv okoliša na pogonsku čvrstoću.

### E) UVJETI ZA ODREĐIVANJE POGONSKE ČVRSTOĆE

1. Postupak pri saniranju zamorom oštećenih konstrukcija.
2. Zahtjevi pri saniranju zamorom oštećenih konstrukcija.
3. Korištenje standarda pri procjeni pogonske čvrstoće.
4. Definicija rasipanja pogonskog opterećenja.
5. Podjela konstrukcija obzirom na njihov značaj za sigurnost i funkcioniranje.
6. Statistički postupak pri određivanju vijeka trajanja – faktor sigurnosti.
7. Vjerojatnost udesa i vijek trajanja.

## **PRILOG – Procijena vijeka trajanja za automobilske komponente**

Prof. Dr. - Ing Vatroslav Grubišić

PROCJENA VIJEKA TRAJANJA ZA AUTOMOBILSKE KOMPONENTE  
FATIGUE LIFE PREDICTION FOR VEHICLE COMPONENTS

Sažetak

Povišeni zahtjevi za smanjenje težine komponenti vozila i pouzdanost njihovog funkcioniranja povećavaju potrebe točne procjene njihovog vijeka trajanja. Dostignuća, metode i ograničenja na tom području su tema ovog priloga.

Abstract

The need for light weight design and improved reliability and safety of vehicle components increased the requirements for their fatigue life predictions. The state of art for the fatigue life predictions and the methods for it will be treated and the limits discussed.

1. UVOD

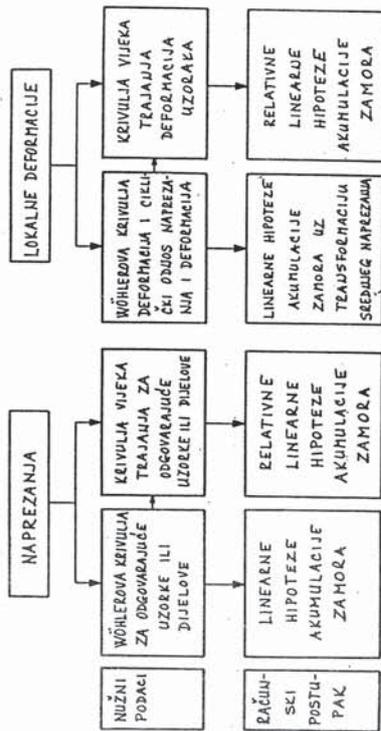
Da bi se sprovelo odgovarajuće dimenzioniranje komponenti vozila potrebne su pouzdane metode za proračun njihovog vijeka trajanja. Primjenom tih metoda može se već pri konstruiranju izvršiti odgovarajuće dimenzioniranje polazeći od djelujućih pogonskih opterećenja i ponašanja konstrukcije, ovisno o upotrebljenom materijalu i proizvodnom postupku. Time se postižu uštede kako na vremenu tako i na troškovima razvoja.

Uglavnom postoje dva osnovna koncepta za proračun vijeka trajanja komponenti vozila [1]:

i - koncept koji polazi od lokalnih naprezanja

- koncept koji polazi od lokalnih deformacija

Na slici 1. su opisana ta dva postupka; tu je navedeno koji su podaci potrebni za njihovu primjenu i kakav računski postupak se primjenjuje.



Slika 1.

Nužni podaci za proračun vijeka trajanja metodom lokalnih naprezanja su Wöhlerove krivulje odgovarajućih probnih uzoraka ili komponenti dok su za metodu koja polazi od lokalnih deformacija to Wöhlerove krivulje plosnatih ili cilindričnih ravnih epruveta pod kontroliranim deformacijama i krivulja odnosa naprezanje i deformacije.

Proračun se u oba slučaja vrši pomoću linearne hipoteze akumulacije oštećenja, poznate pod imenom Palmgren-Minerova hipoteza akumulacije oštećenja, pri čemu se vrše različite modifikacije u odnosu na originalnu hipotezu.

Ukoliko postoje rezultati o vijeku trajanja pri promjenljivim opterećenjima onda se može primijeniti i relativna linearna hipoteza akumulacije zamora, koja je opisana u predavanju Buxbauma kao i u raznoj literaturi [1, 2].

Na slici 2. prikazan je shematski postupak pri proračunu, upotrebom modificirane Palmgren-Minerove hipoteze:

Spektar opterećenja podijeli se na niz nivoa sa određenim brojem promjena opterećenja  $n_i$ . Tako nastali nivoi trebaju približno odgovarati toku kontinuirane krivulje spektra. Odnos  $n_i$  i na tom nivou važećeg broja opterećenja  $N_i$  Wöhlerove krivulje predstavlja vrijednost oštećenja na tom nivou tako da ukupan zbir pojedinačnih oštećenja  $\sum_{i=1}^n n_i/N_i$  daje ukupni faktor zamora  $D_R$  (slika 2.).

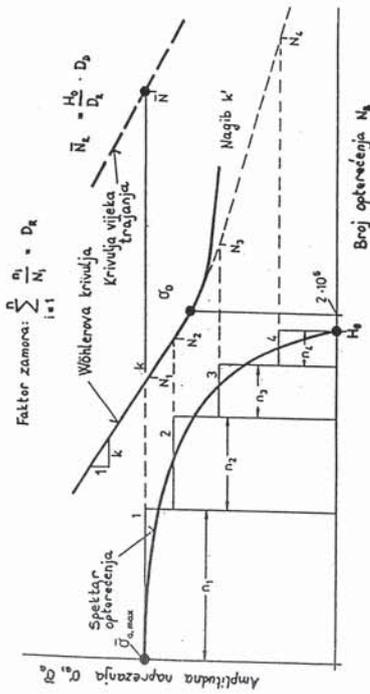
Da bi se uzelo u obzir oštećenja koja nastaju ispod nivoa trajne dinamičke čvrstoće  $\sigma_D$  Wöhlerova krivulja se produžuje iznad  $2 \cdot 10^6$  broja opterećenja sa nagibom  $k$ , koji ovisno o materijalu treba da bude  $k' = 2k - 1$  do  $k' = 2k - 2$  (lijevani materijali, laki metali, varovi); pri tome  $k$  predstavlja nagib Wöhlerove krivulje u području vremenske čvrstoće ( $N \approx 2 \cdot 10^6$ ). Pored te modifikacije originalne Palmgren-Minerove hipoteze potrebno je, da bi se postigla potrebna sigurnost u proračunu, uzeti kao dozvoljen faktor zamora  $D_d$  vrijednosti od 0,1 do 0,5 (ovisno o vrsti opterećenja i stanju naprezanja u kritičnom presjeku).

Računski vijek dakle glasi:

$$\bar{N}_R = \frac{H_0}{D_R} \cdot D_d$$

Tu znače:  $H_0$  = ukupni broj opterećenja spektra,

$D_R$  = računski faktor zamora.



Slika 2.

Mijenjajući veličinu naprezanja spektra dobijaju se pojedine točke krivulje vijeka trajanja čiji matematički odnos glasi:

$$\bar{N}_X = \bar{N}_R / \left( \frac{\sigma_{a,X}}{\sigma_{a,R}} \right)^{-k}$$

- $\bar{k}$  = nagib krivulje vijeka trajanja,
- $\bar{N}$  = vijek trajanja pri spektru sa maksimalnim naprezanjem  $\sigma_{a,X}$ ,
- $\bar{N}_R$  = vijek trajanja pri spektru sa maksimalnim naprezanjem  $\sigma_{a,R}$ .

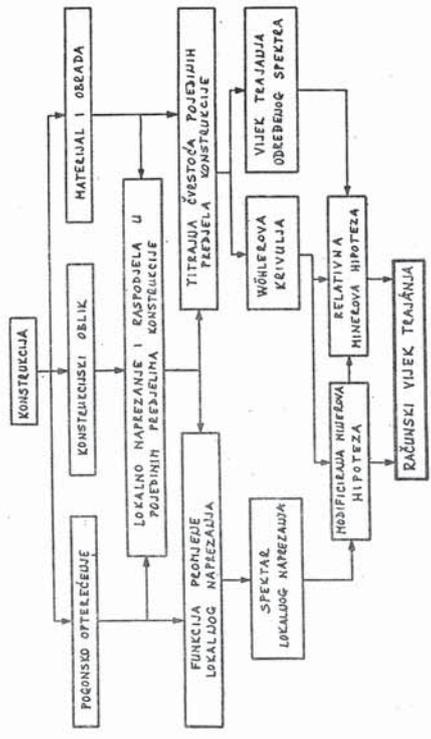
**2. PRORAČUN VIJEKA TRAJANJA METODOM LOKALNIH NAPREZANJA**

Za proračun vijeka trajanja komponenti vozila najviše se upotrebljava metoda koja polazi od lokalnih naprezanja.

Na slici 3. opisan je postupak proračuna. Polazeći od podataka po pogonskom opterećenju i konstrukcionom obliku određuju se lokalna naprezanja i njihova raspodjela u pojedinim predjelima konstrukcije. Promjena pogonskog opterećenja sa vremenom određuje i promjenu lokalnog naprezanja a time i spektar lokalnog naprezanja.

Uzimajući u obzir titrajnu čvrstoću u pojedinim predjelima

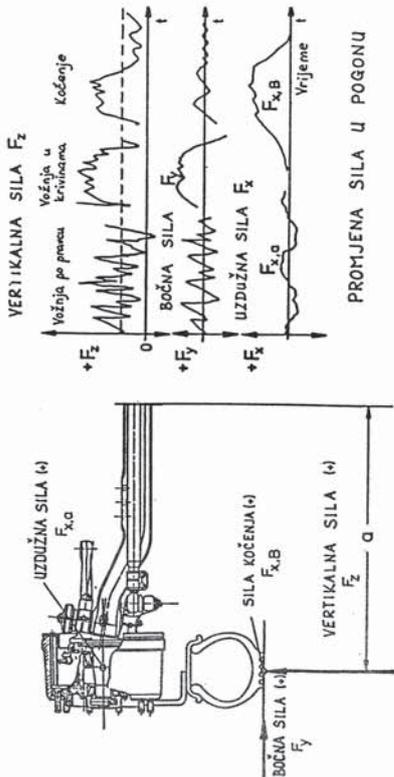
konstrukcije (koja ovisi o materijalu, obradi i stanju naprezanja) u vidu Wöhlerove krivulje ili krivulje vijeka trajanja, određuje se računski vijek trajanja upotrebom modificirane ili relativne hipoteze akumulacije oštećenja:



Slika 3.

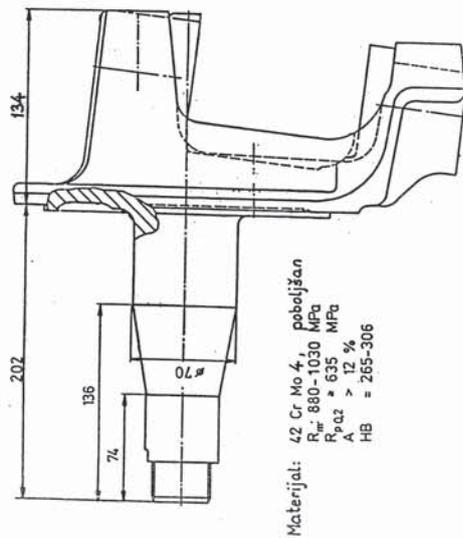
Postupak proračuna vijeka trajanja metodom lokalnih naprezanja biti će opisan na primjeru osovina kotača jednog teretnog vozila.

Na tu komponentu djeluju u pogonu (slika 4.) vertikalne sile  $F_Z$ , bočne sile  $F_Y$ , uzdužne sile u centru kotača  $F_{X,a}$  i sile kočenja  $F_{X,B}$  u površini dodira kotača sa cestom.



Slika 4.

Te sile u pogonu mijenjaju veličinu i smjer ovisno o upotrebi vozila i uvjetima vožnje. Da bi se odredilo naprezanje treba poznavati veličine tih sila i njihov fazni odnos. To se rješava na taj način da se proračun vrši za svaku specifičnu vrstu opterećenja, dakle određuju se posebno naprezanje za vožnju po pravcu, za vožnju u krivinama, kočenje itd.



Slika 5.

Oblik, dimenzije i materijal osovinice dani su na slici 5.

Kako je već navedeno, da bi se odredio spektar pogonskih naprezanja potrebno je odrediti iste za pojedine vrste upotrebe vozila. Obično se to radi na način da se polazeći od konstrukcionog statičkog opterećenja  $F_{z,stat}$  (sila opterećenja na kotaču uslijed težine vozila i dodatnog dozvoljenog nosivog tereta) određuju faktori pomoću kojih se određuju maksimalne sile za pojedine vrste opterećenja [3 - 7]. Pomoću tih sila se određuju maksimalna naprezanja dok se njihova raspodjela i učestalost određuju prema postojećim podacima određenih mnogim mjerenjima i analizama. Ti podaci dani su za osovine vozila u tabeli 1.

| Opterećenje        | Faktor opterećenja     |                          |                 | Parametri spektra $H_g$             | Raspodjela               |          |
|--------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|----------|
|                    | $n_z$                  | $n_y$                    | $n_x$           |                                     |                          |          |
| Vožnja po pravcu   | $n_{z,s}$<br>$n_{z,s}$ | $\pm n_{y,s}$<br>-       | -<br>$+n_{x,s}$ | $0,96 \cdot H_g$<br>-               | $H \cdot 10^{-6}$        | Linearna |
| Vožnja u krivinama | $n_{z,c}$<br>$n_{z,c}$ | $+n_{y,c}$<br>$-n_{y,c}$ | -<br>-          | $0,04 \cdot H_g$<br>$\frac{20}{20}$ | 50                       | Normalna |
| Kočenje            | $n_{z,b}$              | -                        | -               | $n_{x,b}$                           | $5 \cdot 10^5$<br>$10^4$ | Normalna |

pri čemu su:

- $H_g$  - totalna učestalost  $H_g = L \cdot i$
- $H$  - učestalost pojedinih spektra
- $H_e$  - učestalost maksimalnih vrijednosti
- $L$  - konstrukcijski vijek
- $i$  - broj promjena opterećenja po km

Tabela 1.

Pomoću njih se mogu odrediti osnovni parametri spektra naprezanja - maksimalne vrijednosti, raspodjela i učestalost. Spektri naprezanja se obično prikazuju u log - linearnom dijagramu u kojem je apsiscina os na koju se nanosi učestalost opterećenja je logaritamska, a ordinatna os na koju se nanose naprezanja (opterećenja) linearna.

U tom dijagramu uzimaju se za raspodjelu opterećenja uslijed vožnje

U tom dijagramu uzimaju se za raspodjelu opterećenja uslijed vožnje u krivinama ili pri kočenju Gaussova (normalna) raspodjela, a za vožnju po pravcu linearna (slika 6.) - što je rezultat mnogih analiza [3].

Za određivanje faktora opterećenja postoje različite mogućnosti pri čemu služe i podaci dani u literaturi [4] na temelju velikog broja ispitivanja i analiza.

Za komponentu u tretiranom primjeru sile odnosno faktori opterećenja za pojedine vrste uporabe vozila iznose:

#### STATIČKO OPTEREĆENJE

$$F_{z,stat} = 35 \text{ KN}$$

#### MAKSIMALNO DINAMIČKO OPTEREĆENJE PRI VOZNIJI PO PRAVCU

$$\bar{n}_{z,s} = 2,28 + \bar{F}_{z,s} = \bar{n}_{z,s} \cdot F_{z,stat} = 80 \text{ KN}$$

dodatna poprečna sila

$$\bar{n}_{y,s} = \pm 0,35 + \bar{F}_{y,s} = \pm 12 \text{ KN}$$

ili dodatna uzdužna sila

$$\bar{n}_{x,s} = + 0,50 + F_{x,s} = + 18 \text{ KN}$$

#### MAKSIMALNO OPTEREĆENJE PRI VOZNIJI U KRIVINAMA

$$\bar{n}_{z,k,a} = 1,5 + \bar{F}_{z,k,a} = 52 \text{ KN}$$

$$\bar{n}_{y,k,a} = 0,9 + \bar{F}_{y,k,a} = 31 \text{ KN}$$

$$\bar{n}_{z,k,i} = 0,5 + \bar{F}_{z,k,i} = 17 \text{ KN}$$

$$\bar{n}_{y,k,i} = - 0,4 + \bar{F}_{y,k,i} = - 14 \text{ KN}$$

#### MAKSIMALNO OPTEREĆENJE PRI KOČENJU

$$\bar{n}_{z,b} = 2,2 + \bar{F}_{z,b} = 77 \text{ KN}$$

$$\bar{n}_{x,b} = 1,4 + \bar{F}_{x,b} = 49 \text{ KN}$$

Te sile prouzrokuju, za pojedine vrste opterećenja slijedeća maksimalna lokalna naprezanja u kritičnom presjeku:

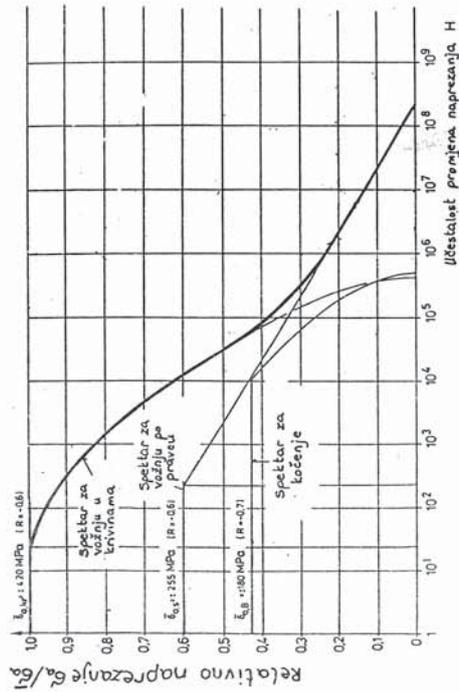
Amplituda naprezanja |MPa|      Odnos naprezanja  
 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$

Vožnja po pravcu:       $\bar{\sigma}_{a,s} = \pm 255$        $\bar{R}_s = - 0,6$

Vožnja u krivinama:       $\bar{\sigma}_{a,kr} = \pm 420$        $R_{kr} = - 0,6$

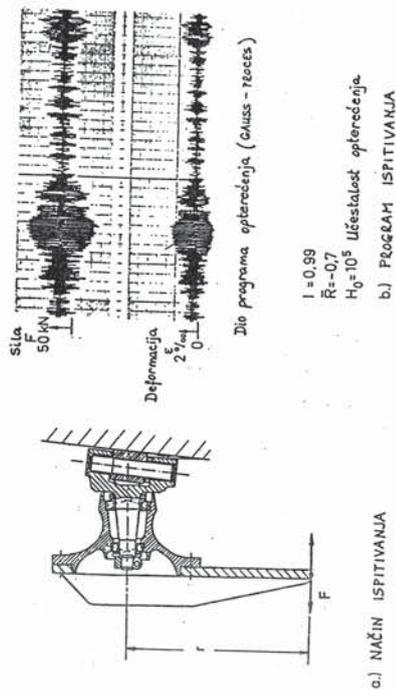
Kočenje:       $\bar{\sigma}_{a,B} = \pm 180$        $\bar{R}_B = - 0,7$

Uzimajući u obzir te vrijednosti i podatke u tabeli 1. određuju se pojedini spektri naprezanja | $\sigma$ | i obzirom da je odnos naprezanja R svih spektara približno isti, njihovim sumiranjem, rezultirajući spektar za konstrukcioni vijek trajanja od 500.000 km.



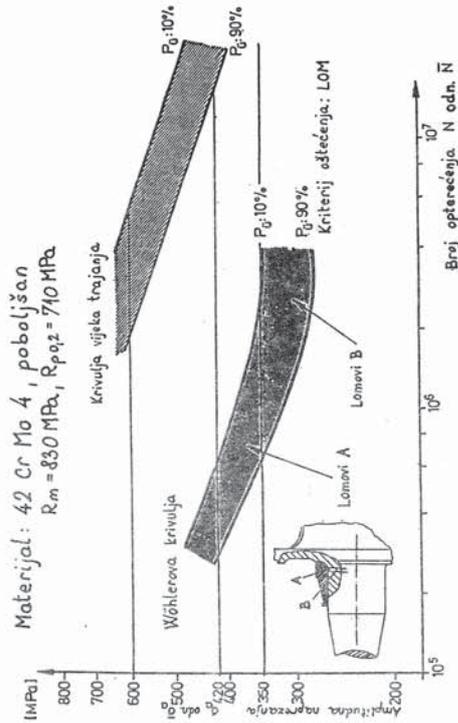
Slika 6.

Čvrstoća konstrukcije u tom predjelu određuje se ispitivanjem shematski prikazanim na slici 7.a. Pri tome se ispitivanje može vršiti ili pod konstantnim amplitudama naprezanja da bi se odredila Wöhlerova krivulja ili sa vremenski promjenljivim amplitudama kao što je pokazano na slici 7.b. Ta ispitivanja su vršena sa standardiziranim spektrom tzv. normalne raspodjele (Gaussov proces) učestalosti naprezanja, pri čemu je faktor pravilnosti promjene  $I = 0,99$ . (I je odnos vrhova i prolaza kroz srednji nivo toka naprezanja tako da kod vrijednosti  $I = 1$  se radi o amplitudno-moduliranom promjenljivom naprezanju), odnos naprezanja  $\bar{R} = 0,7$ , a broj opterećenja jednog ciklusa  $H_0 = 100.000$ .



Slika 7.

Rezultati tih ispitivanja dani su na slici 8. Pri tome je od važnosti da se pri ispitivanju sa konstantnim amplitudama, ovisno o njihovom nivou, pojavljuju lomovi na dva različita mjesta. Na visokom nivou naprezanja lomovi nastaju na mjestu maksimalnog naprezanja u radiusu rukavca (mjesto A) pri čemu broj promjena opterećenja dostiže  $N \leq 8 \cdot 10^5$ ; kod nižih nivoa naprezanje (broj promjena naprezanja  $N > 8 \cdot 10^5$ ) lomovi nastaju uslijed korozije trenja na dodirnom mjestu prstena ležaja i osovinice (mjesto B).



Slika 8.

Proračun vijeka trajanja može se izvršiti pomoću podataka iz Wöhlerove krivulje, pri čemu se na temelju podataka za takvu vrstu pogonskog opterećenja uzima kao dozvoljeni faktor zamora  $D_d \leq 0,2$ . Druga mogućnost je proračun pomoću relativne hipoteze akumulacije oštećenja uzimajući u obzir postojeće spektre pri ispitivanju i spektroodređenom za kritični presjek (slika 8.) i podatke o čvrstoći materijala na slici 8. Zbog razlike između stvarne promjene u pogonu (faktor ravnomjernosti  $I < 1$ ) i upotrebljene kod ispitivanja ( $I \approx 1$ ) treba i u ovom slučaju uzeti dodatni faktor korekcije proračuna  $D_d = 0,5$ , što znači da za određivanje vijeka trajanja relativnom metodom dobiveni računski vijek se dodatno multiplicira sa  $D_d = 0,5$ , da bi se dobila pouzdana vrijednost za vijek trajanja.

Ukoliko spektri opterećenja za pojedine vrste opterećenja imaju različite vrijednosti odnosa naprezanja mora se izvršiti transformacija njihovog inteziteta koristeći podatke o osjetljivosti materijala o srednjem naprezanju.

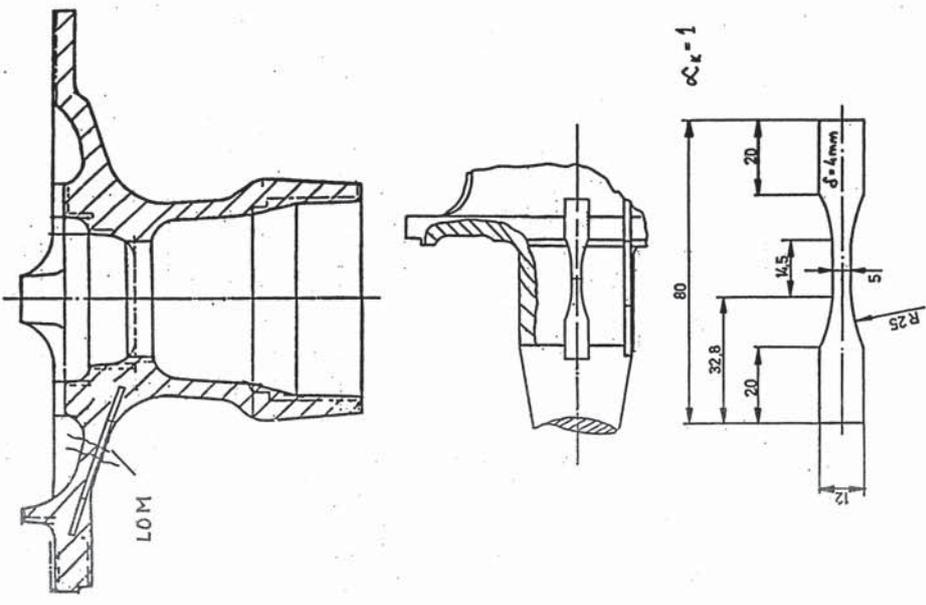
To se vrši tako da se pojedini spektri transformiraju na spektre istog odnosa naprezanja  $\bar{R}$  pri čemu se intenzitet spektra pojačava odnosno umanjuje već prema tome da li je njegova vrijednost za  $\bar{R}$  viša ili niža od one na koju se transformiraju. Za tu svrhu služe podaci o osjetljivosti materijala, o srednjem naprezanju dani na slici 9. Iz tih podataka se vidi da je osjetljivost materijala o srednjem naprezanju, dana faktorom  $M$ , tim viša što je čvrstoća



$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_a \epsilon_a E}$$

Iz krivulje  $\sigma-\epsilon$  se može za svaku vrijednost deformacije odrediti odgovarajuće naprezanje  $\sigma$ . Parametar oštećenja  $P_{SWT}$  odgovara deformacijskom radu koji se nanosi materijalu, pri čemu kod pretežno elastičnih deformacija (dakle deformacija kojima se postiže veliki broj promjena opterećenja do oštećenja) taj parametar neadekvatno uzima u obzir srednje naprezanje pa se za proračun preporučava uzeti u obzir srednje naprezanje prema slici 8 i time transformirati naprezanje na vrijednosti  $R = -1$  za koju postoje podaci Wöhlerove krivulje pri kontroliranim deformacijama (slika 13). Proračun akumulacije oštećenja vrši se kao i kod ostalih metoda pomoću linearne akumulacije zamora (slika 2.). Da bi se provjerila točnost ove metode vršena su ispitivanja s epruvetama koje su uzete neposredno u kritičnom presjeku komponenti, gdje su kod ispitivanja komponenti nastajali lomovi. Time se izbjegava da se, u slučaju odstupanja proračuna od eksperimentalnog rezultata, kao uzrok navodi odstupanje u ponašanju materijala komponente i onog iz banke podataka. U referatu se prikazuju rezultati takvog ispitivanja na glavčini i osovinici kotača. Ta dva primjera su uzeta jer se funkcije naprezanja kod njih bitno razlikuju - kod glavčine je srednje naprezanje jednako nuli, dok se na osovinici kotača za svaku vožnju u krivini mijenja.

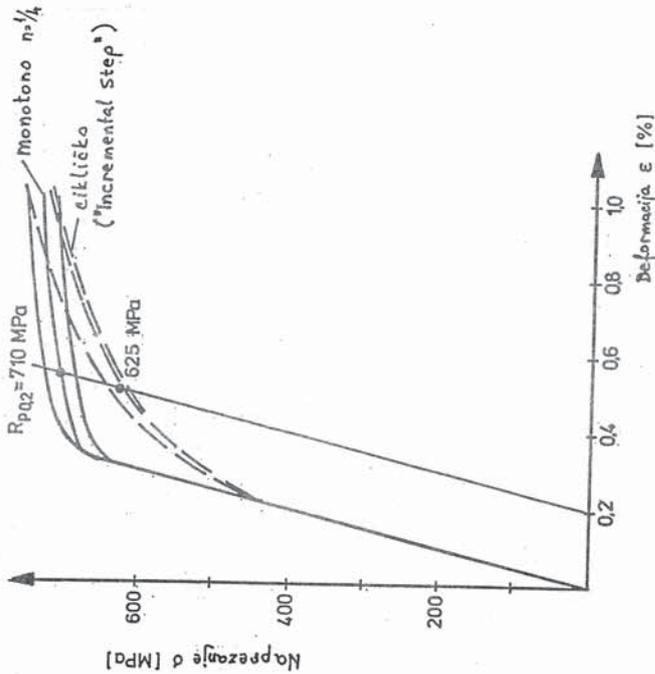
Na slici 11. su prikazane dimenzije epruvete pomoću koje se određuju opterećenja pri aksijalnom (vlačno-tlačnom) opterećenju, kao i mjesta na pojedinim komponentama iz kojih su one uzete.



Slika 11.

Iz krivulje odnosa naprezanja i deformacije  $\sigma-\epsilon$  na slici 12. mogu se odrediti stvarne mehaničke vrijednosti materijala kao i granica plastičnosti  $R_{p0,2}$  pri monotonom i cikličkom opterećenju. Iz tih podataka se vidi da na primjer ovaj materijal omeđava pri cikličkom opterećenju, ali postojeće vrijednosti i čvrstoće materijala  $R_m$  i granice plastičnosti  $R_{p0,2}$  ispunjavaju zahtjeve standarda prema slici 5.

Materijal 42 Cr Mo 4V  
 $R_m = 830 \text{ MPa}$   
 $A_5 = 0,14$   
 $Z = 0,65$



Slika 12.

Na slici 13. je prikazana Wöhlerova krivulja pri ispitivanju sa kontroliranim deformacijama. Krajnje vrijednosti odgovaraju 1/4 ciklusa što predstavlja u stvari krajnje vrijednosti iz krivulje  $\sigma$ - $\epsilon$ . Wöhlerova krivulja pri kontroliranim deformacijama dijeli se na njen plastični dio ( $\epsilon_{a,pl}$ ) i elastični dio ( $\epsilon_{a,el}$ ).

Krajnja vrijednost plastičnog dijela kod 1/4 ciklusa odgovara:

$$\epsilon_{a,pl} = \epsilon_R = \ln \frac{1}{1-Z}$$

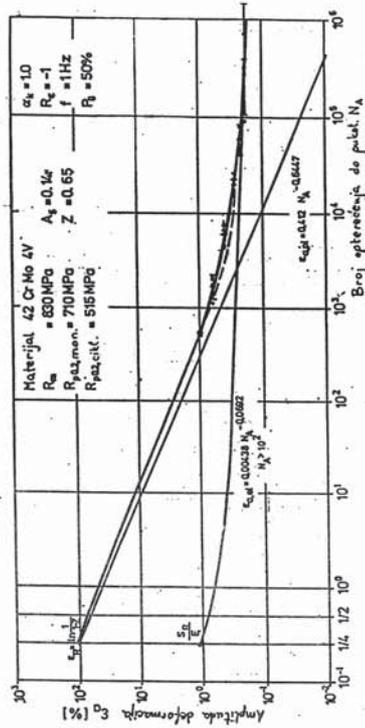
a elastični dio:

$$\epsilon_{a,el} = S_R / E$$

pri čemu je  $S_R$  stvarna čvrstoća materijala. Rezultirajuća Wöhlerova krivulja je

$$\epsilon_{a,uk} = \epsilon_{a,pl} + \epsilon_{a,el}$$

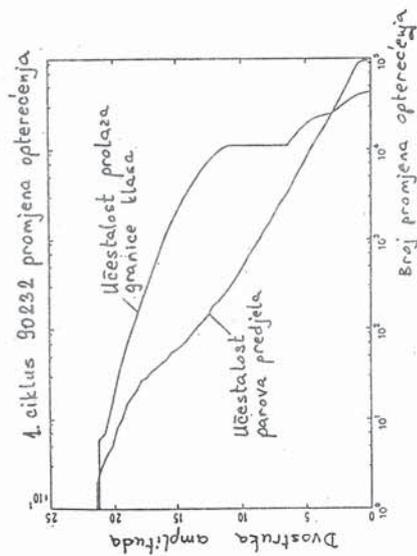
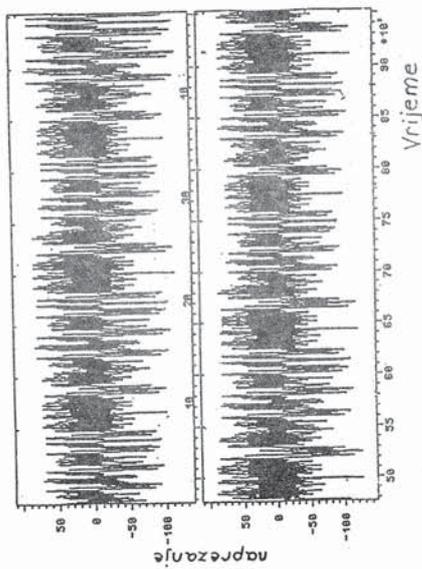
i ona služi za proračun akumulacije oštećenja kod nepravilno promjenljivih pogonskih opterećenja.



Slika 13.

Na slikama 14, 15. i 16. prikazani su tokovi opterećenja pri eksperimentalnom određivanju vijeka trajanja na laboratorijskim simulatorima kao i pomoću različitih metoda analize tih tokova dobivene učestalosti naprezanja.

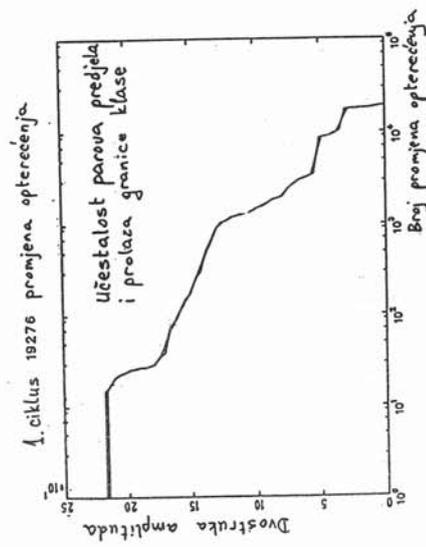
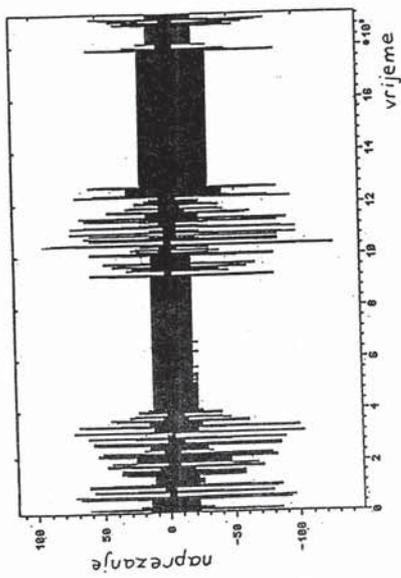
Na slici 14. vidimo da se kod glavčine kotača srednja vrijednost naprezanja ne mijenja, pa zbog toga nema ni razlike u spektrima naprezanja bez obzira da li se analiza vrši brojanjem parova predjele ili prolaza granice pojedine klase.



Slika 14.

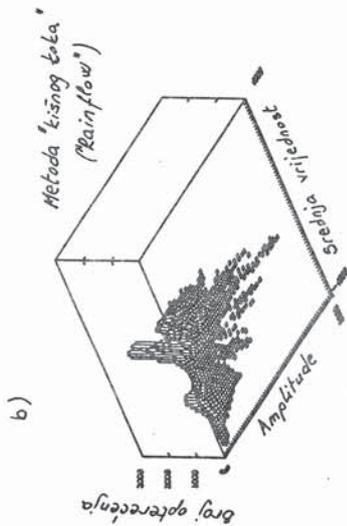
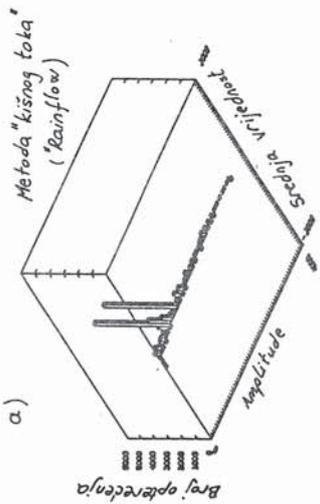
To potvrđuje i dvoparameterska analiza naprezanja (jedan parametar - srednja vrijednost, a drugi - amplituda naprezanja) na slici 16.a.

Za razliku od naprezanja glavčine, kod naprezanja osovinice kotača dolazi do promjene srednje vrijednosti pri vožnji u krivini, što uvjetuje razlike u spektru naprezanja s obzirom na metodu analize, slika 15. Kod analize koja se bazira na brojanju prolaza granice klase spektar naprezanja je "puniji" u odnosu na spektar parova predjela.



Slika 15.

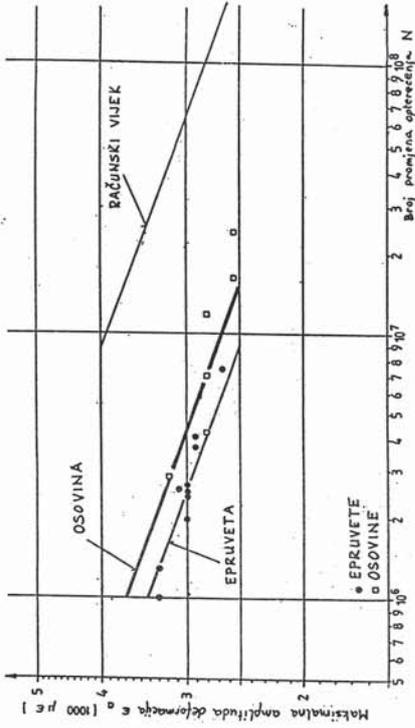
Da bi se odredila akumulacija oštećenja moraju se u tom slučaju poznavati ne samo veličine amplituda, već i vrijednosti srednjeg naprezanja za svaku amplitudu, što se postiže dvoparameterskom analizom čiji su rezultati prikazani na slici 16 b.



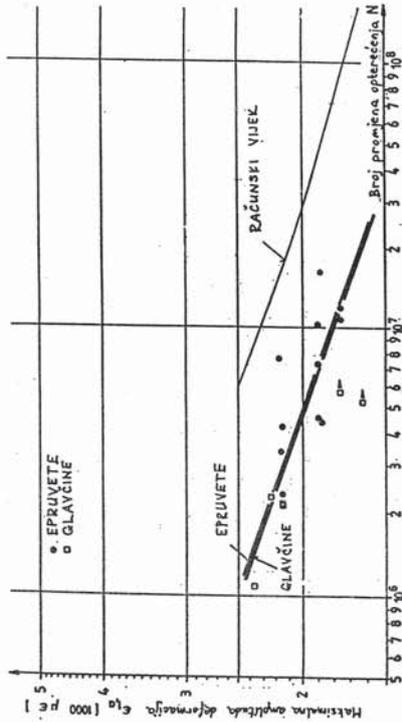
Slika 16.

Na slici 17. i 18. dani su rezultati ispitivanja i proračuna vijeka trajanja.

Osim određivanja vijeka trajanja glavčine i osovinice u odgovarajućim multiaksijalnim simulatorima [5 - 7] određen je i vijek trajanja pri odgovarajućim opterećenjima na epruvetama kako bi se provjerilo da li su razlike u proračunu uvjetovane razlikama između epruvete i komponente (npr. raspodjela naprezanja, razlika u površini itd.). Za ta ispitivanja je pomoću računala simulirano opterećenje koje je bilo mjereno u kritičnom presjeku pojedine komponente, a na posebnom stroju s kojim su vršena ispitivanja za određivanje Wöhlerove krivulje.



Slika 17.



Slika 18.

Rezultati na slikama 17. i 18. pokazuju da su razlike između proračuna metodom lokalnih deformacija i stvarnog vijeka **dosta velike**. Računski vijek je uvijek viši; u slučaju glavčine za faktor 6, a u slučaju osovinice gotovo za 20. Ta razlika između proračuna i stvarnog vijeka trajanja je uvjetovana **uglavnom metodom proračuna**, jer u slučaju simuliranog promjenljivog opterećenja na epruvetama se postiže gotovo isti vijek kao i s komponentama. Pri tome je greška u proračunu to veća što su veće promjene u srednjim naprezanjima, jer je očito da računski postupak ne uzima dovoljno u

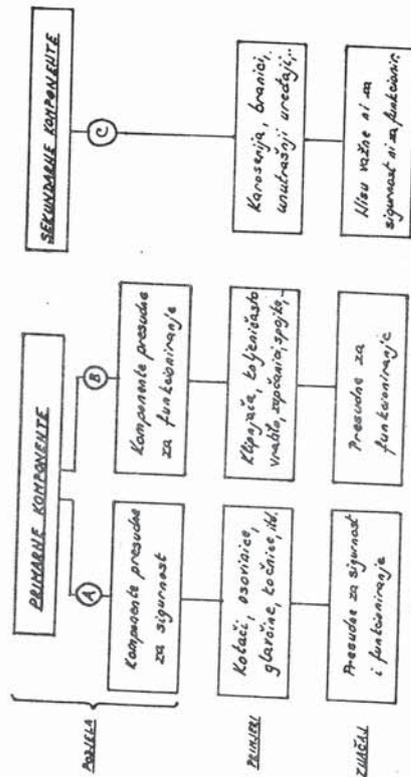
obzir oštećenja uzrokovana malim amplitudama sa povišenim srednjim naprezanjem, što je slučaj kod opterećenja osovinice.

#### ZAKLJUČAK

Iako su u svrhu optimalnog dimenzioniranja teoretske metode proračuna od velike važnosti ipak je njihova primjena s obzirom na postojeće mogućnosti i točnost u automobilskoj industriji dosta ograničena.

U novije vrijeme propagirana metoda proračuna, bazirana na konceptu lokalnih deformacija je mnogo nepouzdanija i netočnija nego do sada upotrebljavane metode; to važi prvenstveno za metodu koja polazi od lokalnih naprezanja i podataka o čvrstoći dobivenih pomoću ispitivanja komponenti kojom se postižu mnogo tačniji proračuni.

Mogućnost primjene teoretskih metoda proračuna u automobilskoj industriji ovisi o aspektima vezanim za značaj pojedinih komponenti, po sigurnost i funkcioniranje vozila. Na slici 19. je izvršena podjela komponenti vozila s obzirom na njihov značaj u sistemu vozila.



Slika 19.

Ovisi o strategiji pojedine firme da li će vijek trajanja za sekundarne komponente (Grupa C) ili čak i primarne komponente (Grupa B) biti određen primarno ili isključivo teoretskim proračunom. Za grupu A primarnih komponenti, o čijem ispravnom funkcioniranju i ispunjenju zahtjeva za vijek trajanja ovisi sigurnost vozila i okoline, a time i životi ljudi, neophodno je potrebno da se dodatnim eksperimentalnim ispitivanjima provjeri i odredi vijek trajanja i sigurnost u vršenju funkcije.