

Primjena Locati-jeve metode za određivanje trajne zarezne čvrstoće materijala X21CrMoV12-1

Klobučar, Danijel

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:828060>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-21**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Danijel Klobučar

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Student:

Danijel Klobučar

Zagreb, 2011.

Sadržaj

Popis slika.....	III
Popis tablica.....	V
Popis oznaka.....	VI
1. Uvod.....	1
2. Zamor materijala.....	2
2.1. Pukotine.....	2
2.2. Lomovi.....	4
2.2.1. Krhki lom.....	6
2.2.2. Zamorni lom.....	6
3. Wöhlerova krivulja.....	11
4. Smithov dijagram.....	13
5. Metode ispitivanja.....	20
5.1. Uvod.....	20
5.2. S-N krivulja.....	20
5.3. Preliminarna ispitivanja.....	21
5.4. Stepenasta metoda.....	21
5.5. Locati metoda.....	22
5.6. Modificirana Locati metoda.....	22
6. Provedba eksperimenta.....	25
6.1 Ispitni uređaj i oblik epruvete.....	25
6.2 Paramteri ispitivanja.....	27
6.3 Rezultati ispitivanja.....	30
6.3.1 Rezultati za pomake.....	30
6.3.2. Rezultati za broj ciklusa.....	33
7. Zaključak.....	36
8. Literatura.....	37
9. Prilog.....	38

Izjavljujem da sam rad izradio samostalno koristeći se stečenim znanjem, navedenom literaturom i opremom Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Janošu Kodvanju, na uloženom trudu, podršci, usmjeravanju u radu te ugodnoj suradnji pri izradi završnog rada.

Također zahvaljujem asistentu Zvonimiru Tomičeviću na pomoći kod korištenja kidalice, laborantu Gordanu Plačku na izradi ispitnih uzoraka i kolegi Anti Bupalu na pomoći pripreme eksperimenta.

Posebno bih se htio zahvaliti svojoj obitelji koja mi je bila velika podrška u dosadašnjem dijelu studija.

U Zagrebu, veljača 2011.

Popis slika

Slika 2.1 Tvrda uključina kao izvor ispodpovršinskog začeca pukotine Cr-Mo čelika.....	3
Slika 2.2 Tri primjera trostrukog začeca mikropukotina na jednom izvoru kod Cr-Mo čelika ASTM A295.....	3
Slika 2.3 Opći izgled površine loma uslijed zamora materijala.....	4
Slika 2.4 Prikaz lomova uslijed zamora materijala a) aksijalno opterećenje, b) istosmjerno savijanje, c) izmjenično savijanje, d) kružno savijanje, e) torzija.....	4
Slika 2.5 Faze rasta pukotine kod cikličkog opterećenja, prva i druga faza.....	8
Slika 2.6 Brazde nastale kod zamornog loma.....	9
Slika 2.7 Cikličko opterećenje.....	10
Slika 3.1 Naizmjenično promjenjivi ciklus normalnog naprezanja pri statičkom savijanju rotirajuće osovine.....	11
Slika 3.2 a) Wöhlerova krivulja dinamičke čvrstoće, b) Wöhlerova krivulja u logaritamskom mjerilu.....	12
Slika 4.1 Nastanak Smithovog dijagrama trajne dinamičke čvrstoće.....	14
Slika 4.2 Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće a) za različite vrste pogona naprezanja, b) konstrukcija Smithovog dijagrama za poznate tri karakteristike čvrstoće: R_{-1} , R_0 i R_e	15
Slika 4.3 Neki od načina aproksimacije linije trajne dinamičke čvrstoće a) Gerberova parabola, b) Goodmanova linija, c) Goodmanova linija presječena granicom tečenja, d) pravac pod definiranim kutem ograničen granicom tečenja.....	16
Slika 4.4 Osnovni principi Smithovog dijagrama	17
Slika 4.5 Određivanje dinamičke čvrstoće za ograničenu trajnost N materijala izloženog cikličkim naprezanjima s koeficijentom asimetrije ciklusa r, a) u odsustvu statičkog prednaprezanja b) uz statičko prednaprezanje σ_{pr}	19
Slika 5.1 Locati metoda.....	24
Slika 5.2 Najpogodnija točka.....	24
Slika 5.3 Tragovi najpogodnije točke.....	24
Slika 5.4 Metoda pogreške.....	24
Slika 6.1 Servohidraulička umaralica LFV-50 HH.....	25

Slika 6.2 Sinusoidalni oblik opterećenja.....	26
Slika 6.3 Dimenzije epruvete s u-utorom.....	26
Slika 6.4 Napolirana epruveta a) prije ispitivanja, b) nakon ispitivanja.....	27
Slika 6.5 Iznos opterećenja u prvom koraku za nepolirane epruvete.....	29
Slika 6.6 Iznos opterećenja u prvom koraku za polirane epruvete.....	29
Slika 6.7 Maksimalni pomaci u prvom i zadnjem ciklusu kod nepoliranih epruveta.....	31
Slika 6.8 Maksimalni pomaci u prvom i zadnjem ciklusu poliranih epruveta.....	32
Slika 6.9 Broj ciklusa do loma kod nepoliranih i poliranih epruveta.....	33
Slika 6.10 Pomak-ciklus za poliranu epruvetu P 7.....	34
Slika 6.11 Wöhler-ova krivulja za nepolirane i polirane epruvete.....	35

Popis tablica

Tablica 6.1 Iznosi opterećenja poliranih i nepoliranih epruveta.....	27
Tablica 6.2 Iznosi opterećenja za nepoliranu epruvetu NP 1.....	28
Tablica 6.3 Rezultati za maksimalne pomake u prvom i zadnjem ciklusu kod nepoliranih epruveta.....	30
Tablica 6.4 Rezultati za maksimalne pomake u prvom i zadnjem ciklusu kod poliranih epruveta.....	31
Tablica 6.5 Rezultati za broj koraka i broj ciklusa do loma nepoliranih epruveta.....	33
Tablica 6.6 Rezultati za broj koraka i broj ciklusa do loma poliranih epruveta.....	33
Tablica 6.7 Opterećenje i broj ciklusa do loma nepoliranih epruveta.....	35
Tablica 6.8 Opterećenje i broj ciklusa do loma poliranih epruveta.....	35

Popis oznaka

F	[N]	- sila
σ_c	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	- kritično vlačno naprezanje
σ	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	- naprezanje
E	[GPa]	- modul elastičnosti
ν	[%]	- Poissonov faktor
a	[mm]	- duljina pukotine
r		- koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja
σ_{\min}	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	- minimalno naprezanje ciklusa naprezanja
σ_{\max}	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	- maksimalno naprezanje ciklusa naprezanja
σ_m	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	- srednje naprezanje ciklusa
N		- broj ciklusa
m		- eksponent Wöhlerove krivulje
σ_{pr}	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	- statičko naprezanje
NP		- nepolirane epruvete
P		- polirane epruvete
k		- koeficijent smjera

1. Uvod

Elementi strojarskih konstrukcija često su napregnuti dinamičkim naprezanjem. Kod dugotrajne izloženosti, zbog zamora materijala može nastupiti lom i pri naprezanjima koja su znatno niža od granice razvlačenja. Ova pojava je posebno izražena kod dijelova s naglašenim geometrijskim diskontinuitetima kao što su utori, provrti i nagle promjene presjeka koji djeluju kao koncentratori naprezanja.

Dinamička opterećenja su opterećenja koja se odlikuju značajnom promjenom intenziteta i smjera djelovanja tijekom vremena pri kojima se deformacije konstrukcije mijenjaju tako da se utjecaj ubrzanja mase konstrukcije odnosno nastale inercijske sile više ne mogu zanemarivati. Stoga se dimenzioniranje dinamički opterećenih dijelova ne može provesti samo na temelju mehaničkih karakteristika dobivenih statičkim vlačnim pokusom, već je potrebno ispitati i zamorno ponašanje materijala.

U ovom radu primjenjena je Locati-jeva metoda za određivanje trajne zarezne čvrstoće materijala X21CrMoV12-1 koji se koristi za izradu turbinskih lopatica. S ciljem određivanja utjecaja kvalitete površinske obrade na zareznu čvrstoću, ispitivanja su provedena na standardnim epruvetama okrugloga presjeka s u-utorom koje su polirane i izrađene tokarenjem standardne kvalitete. Tijekom rada Locati-jevom metodom za određivanje zamornog ponašanja materijala i s radom kidalice napisan je programski kod za skraćeni postupak ispitivanja zarezne čvrstoće materijala.

Rad sadrži uvod, nakon kojeg slijedi drugo poglavlje u kojem je opisan zamor materijala, te pukotine i lomovi. U trećem poglavlju opisana je Wöhlerova krivulja, dok je u četvrtom poglavlju opisan Smithov dijagram. U petom poglavlju su prikazane metode ispitivanja, među kojima je i Locati metoda. Ispitivanje materijala X21CrMoV12-1 i dobiveni rezultati prikazani su u šestom poglavlju. Zaključak temeljen na eksperimentalnim rezultatima dan je u sedmom poglavlju, dok je u zadnjem poglavlju navedena korištena literatura.

2. Zamor materijala

Svaki stroj sastavljen je od određenog broja dijelova koji su potrebni da bi stroj normalno funkcionirao, a te dijelove stroja nazivamo strojnim dijelovima.

Strojni dio je osnovni dio stroja, koji obavlja određenu funkciju skupa s ostalim dijelovima (zakovica, vratilo, osovina, opruga, zupčanik, vijak, matica, itd.). Strojni dio je nemoguće rastaviti na još jednostavnije dijelove.

Strojni dio koji je već neko duže vrijeme podvrgnut naprezanjima koja su promjenjiva u vremenu, lomi se prilikom naprezanja koja su manja od statičke čvrstoće i granice tečenja. Ova pojava se naziva **zamor materijala**.

2.1. Pukotine

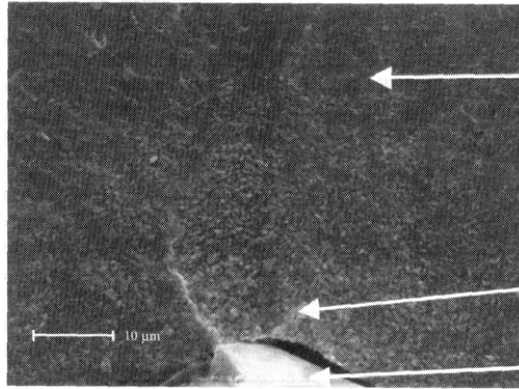
Lomovi uzrokovani zamorom materijala u pravilu nastaju bez prethodnog razvlačenja materijala (što znači bez trajne deformacije i kontrakcije presjeka). Lomovi zbog zamora materijala ne ovise o vrsti materijala, osobini materijala ni o vrsti naprezanja. Naprezanja koja uzrokuju zamorni lom su ispod granice tečenja.

Zamor materijala uvijek započinje začecem inicijalne pukotine, koja se ne vidi golim okom, ali predstavlja mikrokonzraciju naprezanja. Inicijalna pukotina duljine je kristalnog zrna (oko 0,05 mm), a proces začeca pukotine započinje cikličkim gomilanjem plastičnih deformacija na mjestima mikrokonzracije naprezanja.

Počeci mikrokonzracijskih naprezanja su najčešće na površini napregnutog elementa, i to pri dnu udubina površinskih neravnina, u okolini oksida koji djeluju kao strano tijelo (uključina), te na mjestima svih ostalih nehomogenosti izazvanih okolišem i obradom (npr. gubitak ugljika pri kovanju ili uključine pri ljevanju).

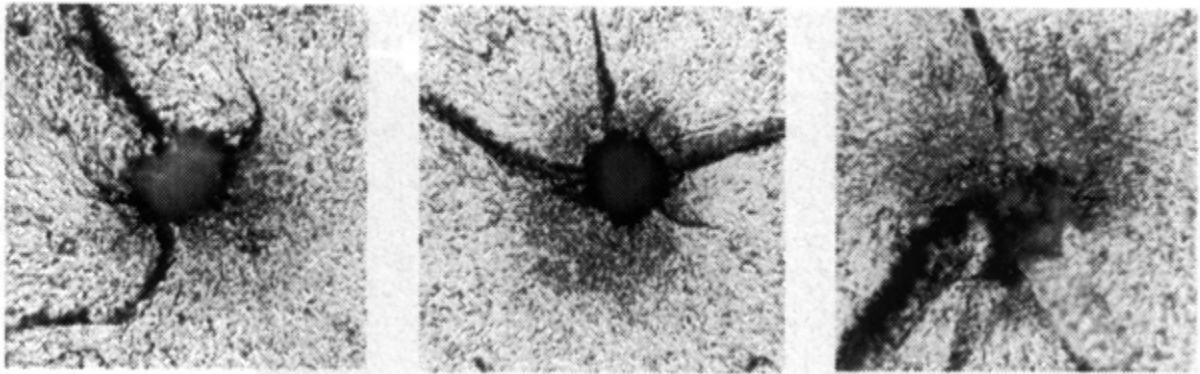
Takva koncentracija naprezanja pogoduje klizanju kristala te širenju pukotine. Treba uzeti u obzir da su važan uzrok začeca pukotine na površini nominalna naprezanja koja su uvijek najveća na površini, tj. pukotina uvijek nastaje na mjestu najvećih naprezanja. U blizini kristalnih zrna nastaju klizne ravnine, najčešće na granici sa nedeformiranim zrnima. Daljnja ciklička opterećenja uzrokuju i samo klizanje, tj. nastaju mikropukotine.

Kada je izvor pukotine pod površinom, onda je to isključivo na mjestima kaverni ili uključina, slika 2.1. Kod sivog lijeva začeca pukotine je redovito na kraju grafitnog listića, koji je dio njegove strukture i predstavlja koncentrador naprezanja.



Slika 2.1 *Tvrda uključina kao izvor ispodpovršinskog začeca pukotine Cr-Mo čelika*

Izvor pukotine može biti i mekana intergranularna zona u kojoj se formira tzv. trostruka točka od koje se iniciraju tri mikropukotine - svaka u svome smjeru, slika 2.2.



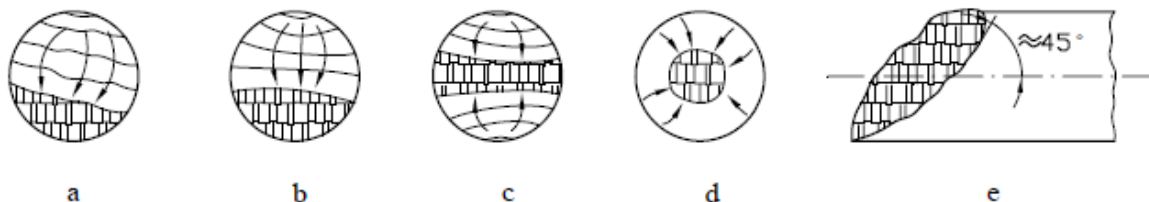
Slika 2.2 *Tri primjera trostrukog začeca mikropukotina na jednom izvoru kod Cr-Mo čelika ASTM A295*

Širenje pukotine je proces koji traje sve dok se ostatak presjeka ne smanji toliko da naprezanja u njemu dostignu vrijednost statičke čvrstoće materijala, pa se on u jednom trenutku nasilno prelomi. Površina loma uzrokovana zamorom materijala ima dvije jasno izražene zone : zonu statičkog loma i zonu širenja pukotine.

Zona statičkog loma su nepravilne i vrlo grube površine koje su karakteristične za statički lom slika (2.3). Zona širenja pukotine je za razliku od zone statičkog loma vrlo glatka, hrapavost joj je na nivoo kristalnih zrna. Shematski izgledi površina nastalih zamornim lomom za različite vrste opterećenja prikazani su na slici 2.4.



Slika 2.3 Opći izgled površine loma uslijed zamora materijala



Slika 2.4 Prikaz lomova uslijed zamora materijala

- a) aksijalno opterećenje b) istosmjerno savijanje c) izmjenično savijanje d) kružno savijanje
e) torzija

Brojne studije su pokazale da najviše lomova kod strojnih dijelova nastaje kao posljedica zamora materijala. Pokretni dijelovi strojeva redovito su izloženi promjenjivim naprezanjima bez obzira na karakter vanjskog opterećenja.

2.2. Lomovi

Klasični pristup nauke o čvrstoći uzima u obzir činjenicu da naprezanja u blizini provrta, utora i sličnih geometrijskih diskontinuiteta mogu prijeći granicu tečenja, ali se pretpostavlja da će se materijal jednostavno plastično deformirati te da će nastati preraspodjela koncentriranih naprezanja.

To često nije točno, jer kod mnogih materijala ne dolazi do preraspodjele naprezanja. Kad se oko pukotina u takvom materijalu pojave velike koncentracije naprezanja, nastaje nestabilno širenje pukotine koje može uzrokovati lom i kod veličina naprezanja mnogo manjih od granice tečenja materijala.

Takvi bi se lomovi mogli izbjeći kad bi sve kritične pukotine mogle biti otkrivene. Iskustvo, međutim pokazuje da se neke pukotine ne mogu otkriti čak ni s pomoću najosjetljivijih metoda ispitivanja. Prema tome, mora se pronaći način da se uzmu u obzir neotkrivene pukotine, tj. racionalni način proračuna koji će uzeti u obzir prisutnost malih skrivenih pukotina.

Pokušaj da se faktori koncentracije naprezanja primijene kod pukotina na bilo kakav koristan način bio bi vrlo kompliciran i sumnjive točnosti, jer faktori koncentracije ne uzimaju u obzir otpornost materijala prema širenju pukotina. Ono što je potrebno jest jednostavan način na koji će se upotrijebiti rezultati mehaničkih ispitivanja materijala prilikom dimenzioniranja konstrukcija.

Za zadano naprezanje ovaj faktor definira najveću dopuštenu duljinu pukotine koja može postojati, a da ne dođe do loma. Nerazarajuće metode ispitivanja materijala imaju zadatak da provjere postojanje takvih pukotina. Naprezanje koje metal može izdržati prije nego dođe do loma obrnuto je proporcionalno veličini pukotine. Što su veće pukotine, bit će manje dopušteno naprezanje. Kad se jednom provjeri da materijal ne sadrži pukotine većih dimenzija od kritičnih, može se biti sigurnim da neće doći do loma konstrukcije. Dimenzioniranje se tada može provesti na osnovu poznatoga dopuštenog naprezanja.

Veliku ulogu u istraživanju lomova imao je Alan Arnold Griffith. Posebno su poznata njegova dva rada u kojima su izvedene jednadžbe:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (\text{RN}) \quad (2.1)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{(1-\nu^2)\pi a}} \quad (\text{RD}) \quad (2.2)$$

gdje je a duljina pukotine, E modul elastičnosti, γ energija površinske napetosti po jedinici debljine ploče (potrebna energija da se stvore dvije nove površine prijeloma), ν je Poissonov koeficijent, dok je σ_c kritična veličina vlačnog naprezanja pri kojemu se lom dalje odvija bez dodatnog utroška energije. *RN* oznaka se odnosi na ravninsko stanje naprezanje, odnosno *RD* na ravninsku deformaciju.

Svoje postavke Griffith je eksperimentalno dokazao na staklu koje se lomi krhko, gotovo i bez najmanje plastične deformacije oko vrška pukotine. Griffith je također objašnjavao da je manja realna čvrstoća krhkih materijala uzrokovana postojanjem pukotina, te je prvi pokazao da one pridonose i koncentraciji naprezanja. Pri tome kod realnih materijala smanjenju čvrstoće pridonose i druge pojave, kao što su nehomogenost materijala, greške kristalne rešetke, dislokacije i pore.

Lom koji se odvija pri malim deformacijama karakterizira se nagomilavanjem pogrešaka u materijalu (*mikropore, mikropukotine*) u tijeku vremena, čime se smanjuje njegova čvrstoća. Pojava i porast mikropukotina dovodi, na kraju, do njihova spajanja i stvaranja *makropukotina*. U toj fazi lom uglavnom i ovisi o rasporedu makropukotina.

Zbog toga analiza krhkog loma zahtijeva ispitivanje ponašanja tijela oslabljenog dovoljno velikim pukotinama, pogotovo kod materijala koji su krhki, jer kod njih i male pukotine naglo smanjuju čvrstoću.

2.2.1. Krhki lom

Iscrpnije proučavanje mehaničkih svojstava konstrukcijskih materijala također pridonosi boljem uočavanju problema razvoja pukotina i loma. Poznavanje tih svojstava pokazuje da su posljedice krhkoga loma u konstrukcijama katastrofalne, zbog čega se istražuju mogućnosti kako da se krhki lom izbjegne. Radi toga se proučavaju uvjeti nastanka krhkog loma i utvrđuje se da pojavi krhkog loma pogoduju:

- velike brzine djelovanja opterećenja, čime se onemogućava razvoj plastične deformacije, za koju je potrebno određeno, konačno vrijeme,
- izražena koncentracija naprezanja na mjestima geometrijskih diskontinuiteta (prijelazna zaobljenja, otvori, zarezi, pukotine),
- uporaba konstrukcija od čelika na temperaturama nižim od temperature nulte duktilnosti (plastičnosti), kod kojih se neke vrste čelika ponašaju izrazito krhko.

Također je ustanovljeno da će se krhki lom pojaviti u uvjetima ravninske deformacije. Ova je spoznaja iskorištena za dvije vrlo važne primjene. Prva se odnosi na opisivanje ponašanja materijala u uvjetima razvoja krhkog loma, pa se kao glavni zahtjev za opisivanje parametra krhkog ponašanja materijala postavlja da ispitni uzorak bude u stanju ravninske deformacije.

Druga primjena ide za tim da se otkloni opasnost od pojave krhkog loma, što je moguće ako se osiguraju uvjeti da u konstrukciji vlada ravninsko stanje naprezanja, a ne ravninske deformacije. U opterećenim konstrukcijskim elementima ravninsko stanje deformacija postojat će velikim debljinama presjeka i na mjestima izražene koncentracije naprezanja (kao što su geometrijski diskontinuiteti pukotine i druge pogreške u materijalu, područja promjene strukture), ako je materijal sklon krhkom ponašanju. Opasnost od pojave katastrofalnog krhkog loma može se pogodnim rješenjem pri projektiranju osjetno ublažiti.

2.2.2. Zamorni lom

Lom zbog cikličnog opterećenja (zamorni lom) je najučestaliji oblik loma u praksi. Takvi lomovi nastaju kod veličina naprezanja koja su manja od vlačne čvrstoće čak i kod normalno duktilnih materijala niske čvrstoće.

Proces zamora materijala pri cikličnom opterećenju može se podijeliti u tri faze:

- iniciranje pukotine,
- propagacija pukotine do kritične veličine,
- nestabilni lom završnog dijela presjeka.

Zamor nastaje kao rezultat plastične deformacije i u razdoblju inicijacije, i u razdoblju propagacije pukotine. Sve do završnog loma zamorno širenje pukotine određeni je oblik duktilnog loma materijala, iako je ta duktilnost, potpuno lokalne prirode, ograničena samo na procesnu zonu.

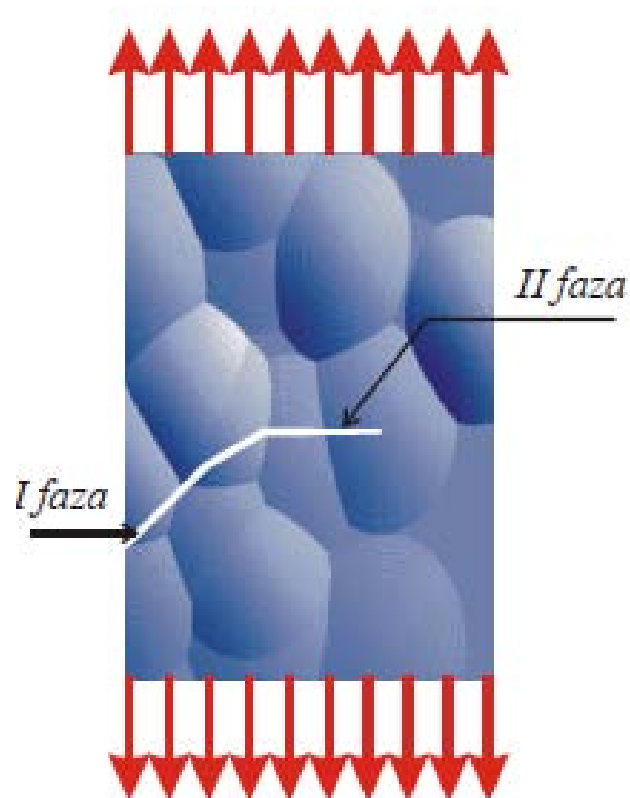
Zamorni je efekt zapravo kumulativno djelovanje mikroskopski ograničenih zbivanja kojih može biti više milijuna u jednome procesu zamornog loma pa je teško unaprijed predvidjeti vijek trajanja elementa koji je počeo pucati i koji je trajno izvrnut cikličkom opterećenju.

Pukotine kod zamora mogu se izazvati na više načina, no važna je činjenica da se one počinju formirati na slobodnoj površini. Zbog toga je vrlo važno stanje površine pri ispitivanju otpornosti na zamor. Općenito što je materijal čvršći veći je utjecaj stanja površine na zamor. Niska zamorna čvrstoća nepoliranog materijala u stanju kakav se isporučuje posljedica je površinskih slojeva oksida nastalih kovanjem ili valjanjem. Ti su slojevi često neduktilni, lako pucaju pa tako postaju izvorni elementi koncentracije naprezanja. Gubitak ugljika u površinskome sloju, drugi je česti uzrok smanjenja zamorne čvrstoće. Iako se taj gubitak može donekle izbjeći skidanjem razugličenoga sloja (tokarenjem), treba imati na umu da već sam proces skidanja strugotine ima važan utjecaj na smanjenje zamorne čvrstoće. Ponovno pougljeničenje, kao i površinsko valjanje i prskanje metalnim granulatom, može povisiti otpornost materijala na ciklično opterećenje.

Inicijatori zamornog loma mogu se pojaviti i na drugim formacijama na površini materijala ili u njenoj blizini. Početak pukotine može dolaziti od prsnute čestice (tvrde uključine ili izlučine) na površini ili pod površinom elementa. Isto tako izvor loma može biti i mekana intergranularna zona koja često označuje tzv. trostruku točku (tri smjera pucanja). Neki slučajevi inicijalizacije pukotine posebno su značajni za razumijevanje osnovnih pojava koje su specifične za ciklička opterećenja. Tako npr. pukotina može početi na kliznim pojasevima koji se oblikuju za vrijeme cikličkih opterećenja kao posljedica akumulacije dislokacija. S tih kliznih pojaseva protrudiraju ekstruzije ili čupavi djelići materijala, koji postaju koncentratori naprezanja i na taj način žarište loma.

Kad je jednom pukotina inicirana na površinskome kliznome pojasu u jednom jedinom kristalu, ona će se nastaviti širiti u smjeru primarnih ploha klizanja. To se očituje stvaranjem kliznih pojaseva od kojih polazi pukotina prije nego što skrene u ravninu koja stoji makroskopski okomito na maksimalno vlačno naprezanje. Prije ove promjene smjera govori se o prvoj fazi širenja pukotine, a nakon skretanja, o drugoj fazi (slika 2.5).

U kojem će trenutku nastati promjena smjera, ovisi o intenzitetu vlačnog naprezanja. Kod manjih vlačnih naprezanja prva će faza zauzimati veće područje na plohi loma. Prva je faza često vrlo izražena kod torzijskih cikličkih opterećenja. Pri velikim vlačnim naprezanjima može se dogoditi da se prva faza i ne može zamijeniti (npr. kod oštro urezanih uzoraka s velikim faktorom koncentracije naprezanja). U tom slučaju rast pukotine teče praktično na način tipičan za drugu fazu od samog početka.



Slika 2.5 Faze rasta pukotine pri cikličkom opterećenju, prva i druga faza

Druga faza rasta može se istraživati pod uvjetima velike amplitude deformacije materijala jer se plastična deformacija koja nastaje na vršku pukotine može u tim uvjetima izravno promatrati. To je i razlog što se o drugoj fazi rasta zna više pa je mehanizam rasta u toj fazi zadovoljavajuće objašnjen. Jedna od najvažnijih značajki druge faze jest da pukotina napreduje konačnim priraštajima, od kojih svakom priraštaju odgovara jedan ciklus opterećenja. Druga važna značajka jest pojava markacija na površini loma, koje se nazivaju brazdama ili strijacijama (slika 2.6). Svakoj brazdi odgovara jedan ciklus opterećenja, tako da brojanje brazdi omogućuje brojanje mikronapredovanja fronte pukotine, a još je važnije i praćenje toka širenja pukotine.



Slika 2.6 Brazde nastale kod zamornog loma

Na početku ciklusa opterećenja vršak je pukotine oštar, ali za vrijeme povećanja opterećenja postaje tup i istodobno se plastična zona pred vrškom širi. Koliko će to širenje biti, ovisi o intenzitetu naprezanja. Upravo za vrijeme maksimalnog vlačnog naprezanja nastupa daljnji lom ligamenata procesom plastičnog loma ili odreza. Za vrijeme sljedeće faze, faze smanjivanja opterećenja, ponovo se oblikuje oštri vršak pukotine. Pri tome se plastično rastegnuti materijal na vršku pukotine komprimira i oblikuje se brazda na površinama pukotine. Ispupčivanje je materijala pri vršku pukotine razumljivo, jer otvor je pukotine jedini slobodni put plastičnom tečenju materijala. Nakon toga proces se nastavlja.

Izmjenično otupljivanje i ponovo zaoštavanje vrška pukotine osnovna je značajka druge faze rasta. Kod intenzivnih naprezanja i niskofrekventnih cikličkih opterećenja brazde se vide golim okom, dok se prilikom naprezanja male amplitude ili kod visokofrekventnih opterećenja mogu vidjeti tek elektronskim mikroskopom. Ova pojava nije ograničena samo na kristalna čvrsta tijela već je prisutna i kod nekristaličnih polimera.

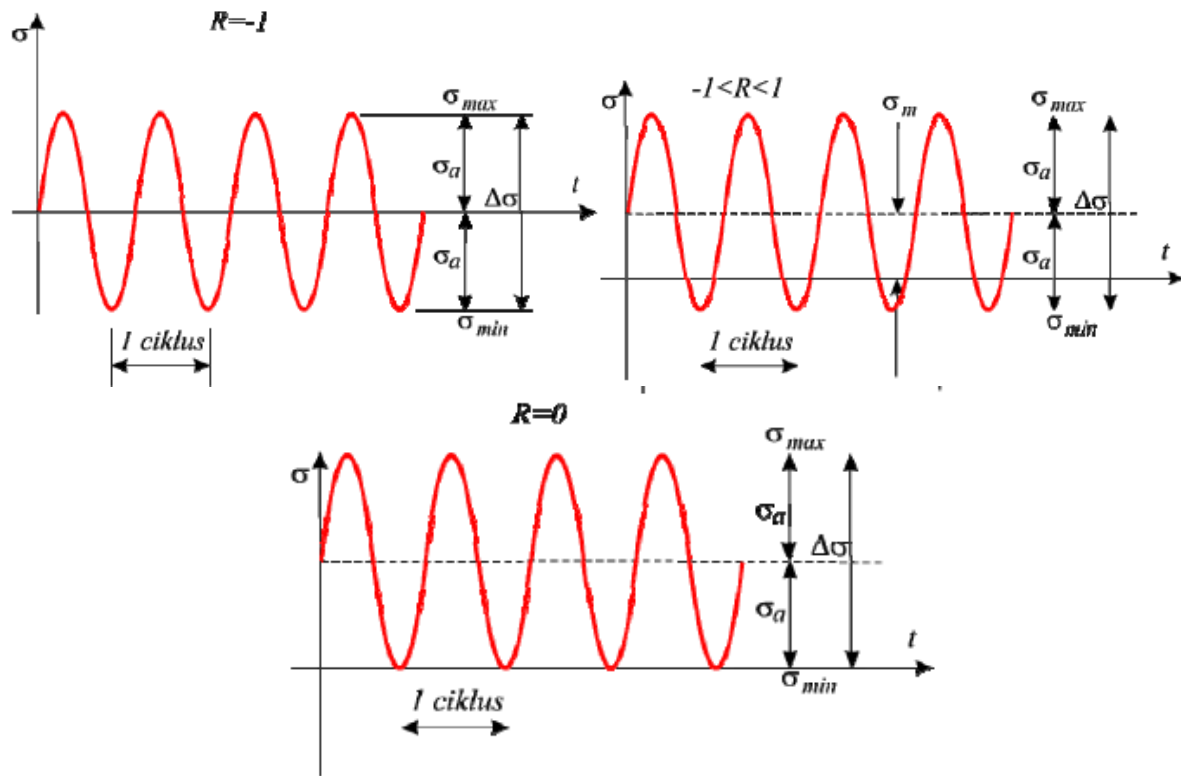
U trećoj fazi rasta pukotine nastaje naglo nestabilno širenje pukotine. Kod materijala sklonih krhkom lomu ova će faza započeti u trenutku kada je postignuta kritična duljina pukotine, dok će kod duktilnih materijala početak treće faze ovisiti o naprezanju u oslabljenom dijelu presjeka.

Pri cikličkom opterećenju naprezanja se mijenjaju u ovisnosti o vremenu periodično (slika 2.7). Pri tome je:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.4)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.5)$$



Slika 2.7 Cikličko opterećenje

3. Wöhlerova krivulja

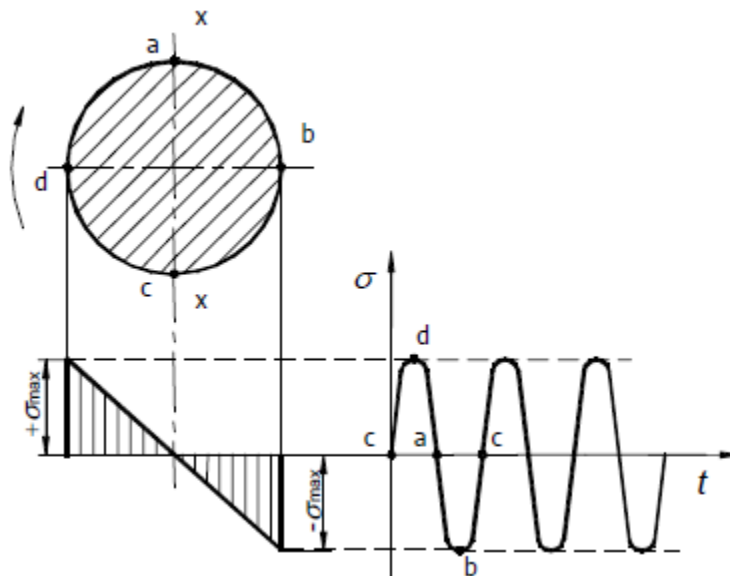
Mjerodavna karakteristika čvrstoće pri promjenjivim naprezanjima strojnih dijelova jest dinamička čvrstoća (ili granica zamora) strojnog dijela, koja se dobiva ispitivanjem na zamor samog strojnog dijela ili se izračuna na temelju ispitivanja zamora na odgovarajućoj epruveti.

Prilikom eksperimenta epruvete su izložene periodično promjenjivim opterećenjima određenog inteziteta, sve do pojave loma (slika 3.1). Ispitivanja se provode za određeni koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.1)$$

gdje je:

- r - koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja,
- σ_{\min} - minimalno naprezanje ciklusa naprezanja,
- σ_{\max} - maksimalno naprezanje ciklusa naprezanja.



Slika 3.1 Naizmjenično promjenjivi ciklus normalnog naprezanja pri statičkom savijanju rotirajuće osovine

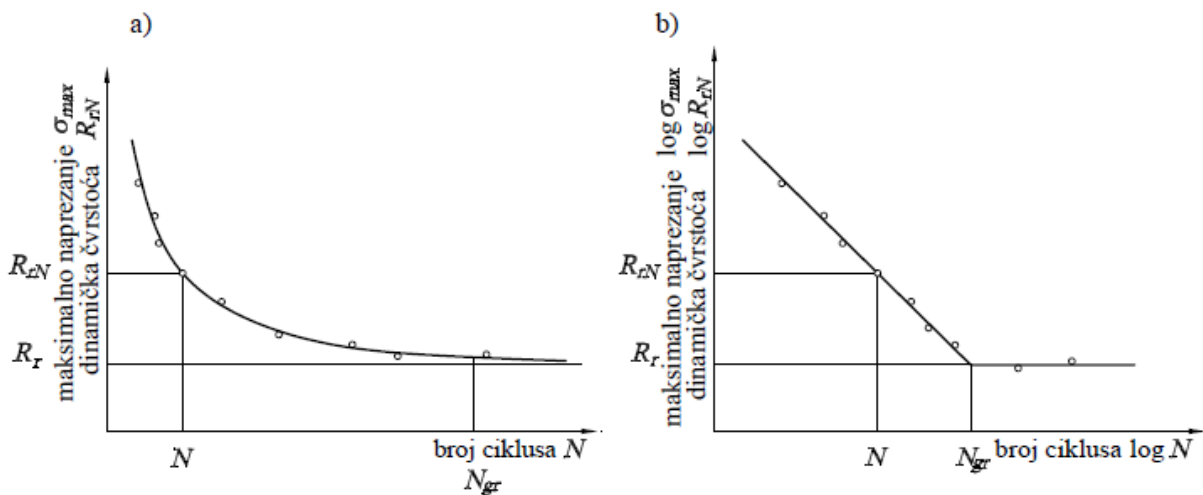
Najčešće je $r = -1$ i $r = 0$, ali za nekoliko različitih nivoa maksimalnih naprezanja. Za svaki od ovih nivoa naprezanja bilježi se broj ciklusa naprezanja N , nakon kojeg je došlo do loma epruvete. Rezultati ispitivanja unose se u $\sigma-N$ dijagram, a dobivena krivulja odgovara eksponencijalnoj krivulji poznatoj pod imenom Wöhlerova krivulja (po njemačkom inženjeru, koji je prvi izveo opisane eksperimente), ili krivulja dinamičke čvrstoće materijala (krivulja zamaranja), slika 3.2a.

Wöhlerova krivulja se asimptotski približava pravcu $\sigma = R_r$, pri čemu se R_r naziva trajnom dinamičkom čvrstoćom materijala izloženog ciklički promjenjivim naprezanjima s koeficijentom asimetrije ciklusa r . Očito, trajna dinamička čvrstoća materijala je ono maksimalno naprezanje ciklusa asimetrije r pri kojem epruveta doživi beskonačno mnogo ciklusa, tj. neograničenu trajnost. Wöhlerova krivulja se obično crta u logaritamskim kordinatama, gdje postaje karakteristični pravac s "koljenom" u točki N_{gr} , slika 3.2b. Jednadžba Wöhlerove krivulje se obično piše u obliku

$$R_{rN}^m \cdot N = R_r^m \cdot N_{gr} = const \quad (3.2)$$

gdje je

- R_{rN} - vremenska dinamička čvrstoća za trajnost u ciklusima N ,
- N - broj ciklusa do loma pri maksimalnom naprezanju ciklusa R_{rN} ,
- N_{gr} - broj ciklusa na prelazu između vremenske i trajne dinamičke čvrstoće. Za čelike obično oko 10^7 ciklusa, za obojene metale oko 10^8 ciklusa, a varira s asimetrijom ciklusa i vrstom naprezanja,
- m - eksponent Wöhlerove krivulje tj. nagib Wöhlerove krivulje u logaritamskim koordinatama, $m=3\ldots 13$ ovisno o materijalu, obliku strojnog dijela ili vrsti spoja, te vrsti naprezanja.



Slika 3.2 a) Wöhlerova krivulja dinamičke čvrstoće, b) Wöhlerova krivulja u logaritamskim koordinatama

Daljnijim istraživanjima je ustanovljeno da ovaj izraz vrijedi za sve materijale, za svaku vrstu napreznja, te za svaki ciklus, inače definiran koeficijentom asimetrije ciklusa $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

Tako je postalo moguće u svakoj prilici odrediti najveći nivo napreznja da bi vijek trajanja bio jednak ili veći od unaprijed zadanog, ili pak odrediti vijek trajanja elementa stroja ili konstrukcije za poznato opterećenje.

No, za to je potrebna Wöhlerova krivulja, a za njeno određivanje su potrebna dugotrajna i skupa testiranja. Zato se na osnovi samo jedne Wöhlerove krivulje (obično za $r=-1$ ili $r=0$) konstruira tzv. Smithov dijagram iz kojeg je moguće odrediti dinamičku čvrstoću za bilo koje srednje napreznje, tj. za vremenski promjenjiva napreznja s proizvoljnom asimetrijom ciklusa.

4. Smithov dijagram

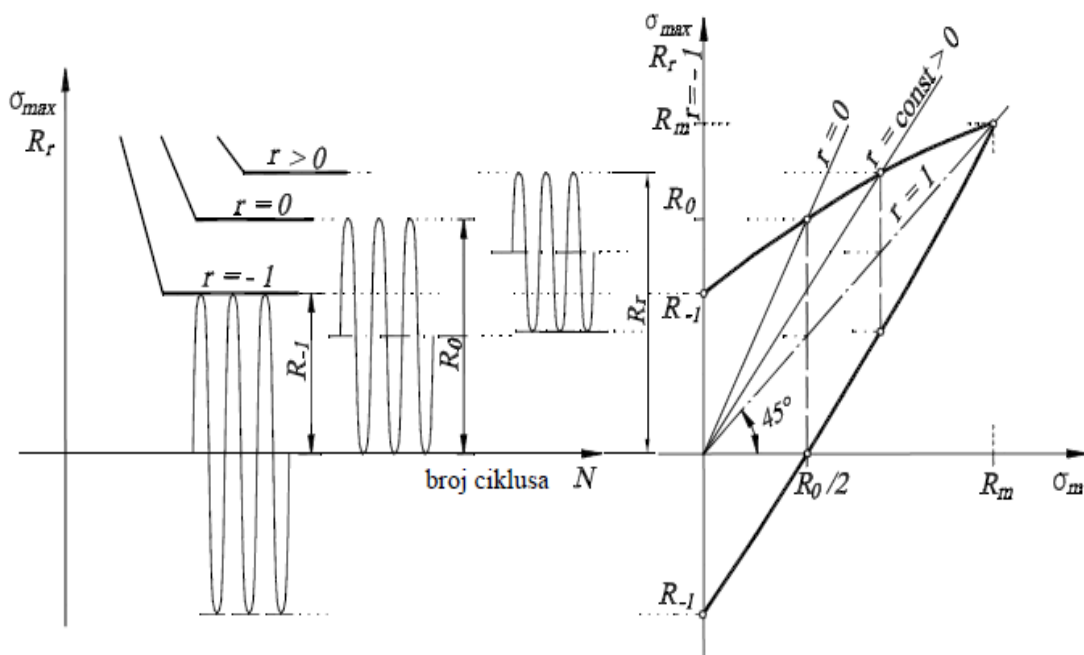
Smithov dijagram se dobiva unošenjem u njegove koordinate ($\sigma_{\max} = R_r, \sigma_m$) vrijednosti maksimalnog $\sigma_{\max} = R_r$ i minimalnog napreznja σ_{\min} na nivou trajne dinamičke čvrstoće za pripadajuću srednju vrijednost napreznja σ_m , za nekoliko ciklusa različitih asimetrija r , slika 4.1. Simetrala dijagrama ucrtava se pod kutem od 45° i predstavlja pravac, čije su ordinate jednake apscisama tj. srednjim napreznjima ciklusa. Očito je da konture Smithovog dijagrama omeđuju polje trajne dinamičke čvrstoće. Prijelaz maksimalnog ili minimalnog napreznja izvan konture dijagrama znači zamorni lom.

Razumljivo je također, da su Smithovi dijagrami različiti za različite vrste napreznja, slika 4.2a. Najveću površinu zauzima Smithov dijagram za savijanje, a najmanju za torziju. To znači da su dinamičke čvrstoće na savijanju najveće, a na torziju najmanje. Pri tome gornja krivulja (maksimalnih napreznja ciklusa) Smithovog dijagrama predstavlja liniju trajne dinamičke čvrstoće pa se najčešće crta sama ta linija.

Na taj način se Smithov dijagram aproksimira kao linija koja povezuje obično samo jednu (najčešće R_{-1}) karakteristiku dinamičke čvrstoće i jednu (R_m ili R_e) karakteristiku statičke čvrstoće, slika 4.2b.

Najsličnija izvorišnom Smithovom dijagramu jest aproksimacija u obliku (Gerberove) parabole između točaka $(0, R_{-1})$ i (R_m, R_m) (slika 4.3a.), ali se on ipak najčešće aproksimira pravcem između istih točaka (slika 4.3b) u kojem slučaju se taj pravac naziva Goodmanovom linijom.

Kod rastezljivih materijala se ova linija trajne dinamičke čvrstoće obično ograničava granicom tečenja, jer plastične deformacije najčešće nisu dopuštene niti kod dinamičkih napreznja. Shematizacija Smithovog dijagrama se tada najpreciznije provodi prema slici 4.2b, a može se provesti i prema slikama 4.3a do 4.3d.



Slika 4.1 Nastanak Smithovog dijagrama trajne dinamičke čvrstoće

Treba zapaziti da svaka točka T u koordinatama (σ_m, σ_{max}) Smithovog dijagrama definira određeno cikličko naprezanje, slika 4.4. Naime, uz poznato srednje i maksimalno naprezanje, koje definira točka T, poznato je i amplitudno naprezanje $\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_m$, te minimalno naprezanje $\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$, pa je ciklus potpuno definiran. Također, svaki pravac povučen kroz ishodište je geometrijsko mjesto maksimalnih naprezanja različitih ciklusa jednakog koeficijenta asimetrije r . Naime, koeficijent smjera k tog pravca je

$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{max}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{2}{1+r} \quad (3.1)$$

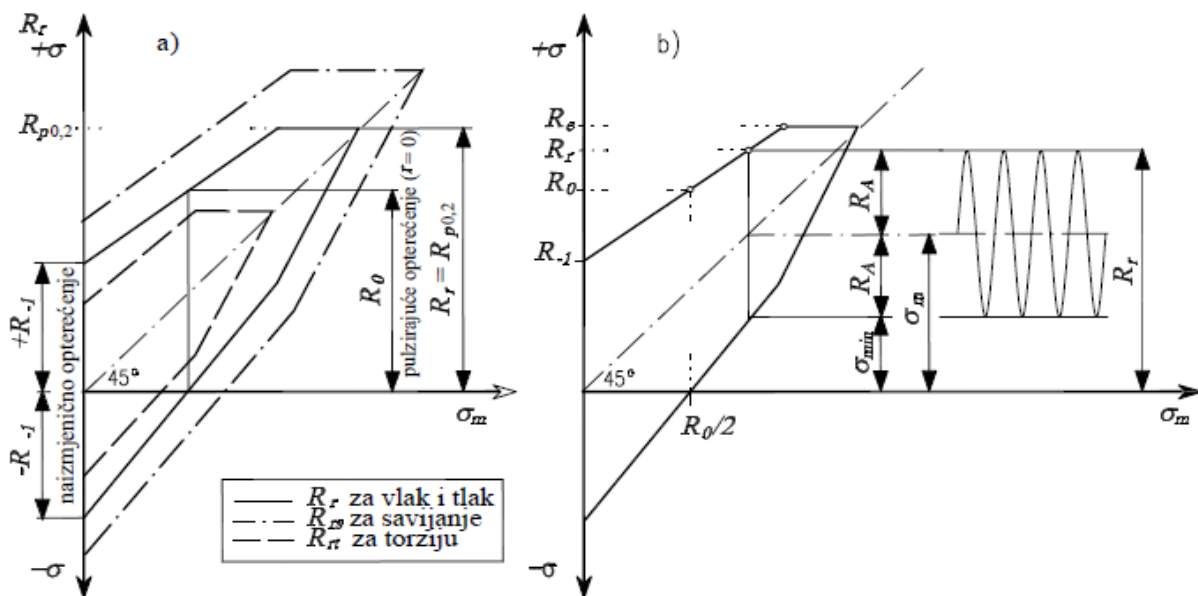
gdje je

- σ_{max} - maksimalno naprezanje ciklusa,
- σ_m - srednje naprezanje ciklusa,
- σ_{min} - minimalno naprezanje ciklusa,
- r - koeficijent asimetrije ciklusa radnih naprezanja, $r = \sigma_{min}/\sigma_{max}$.

Odatle slijedi da svaka točka pravca predstavlja ciklus napreznja jednakog koeficijenta asimetrije. Zato se taj pravac označuje s $r = const$, slika 4.4b.

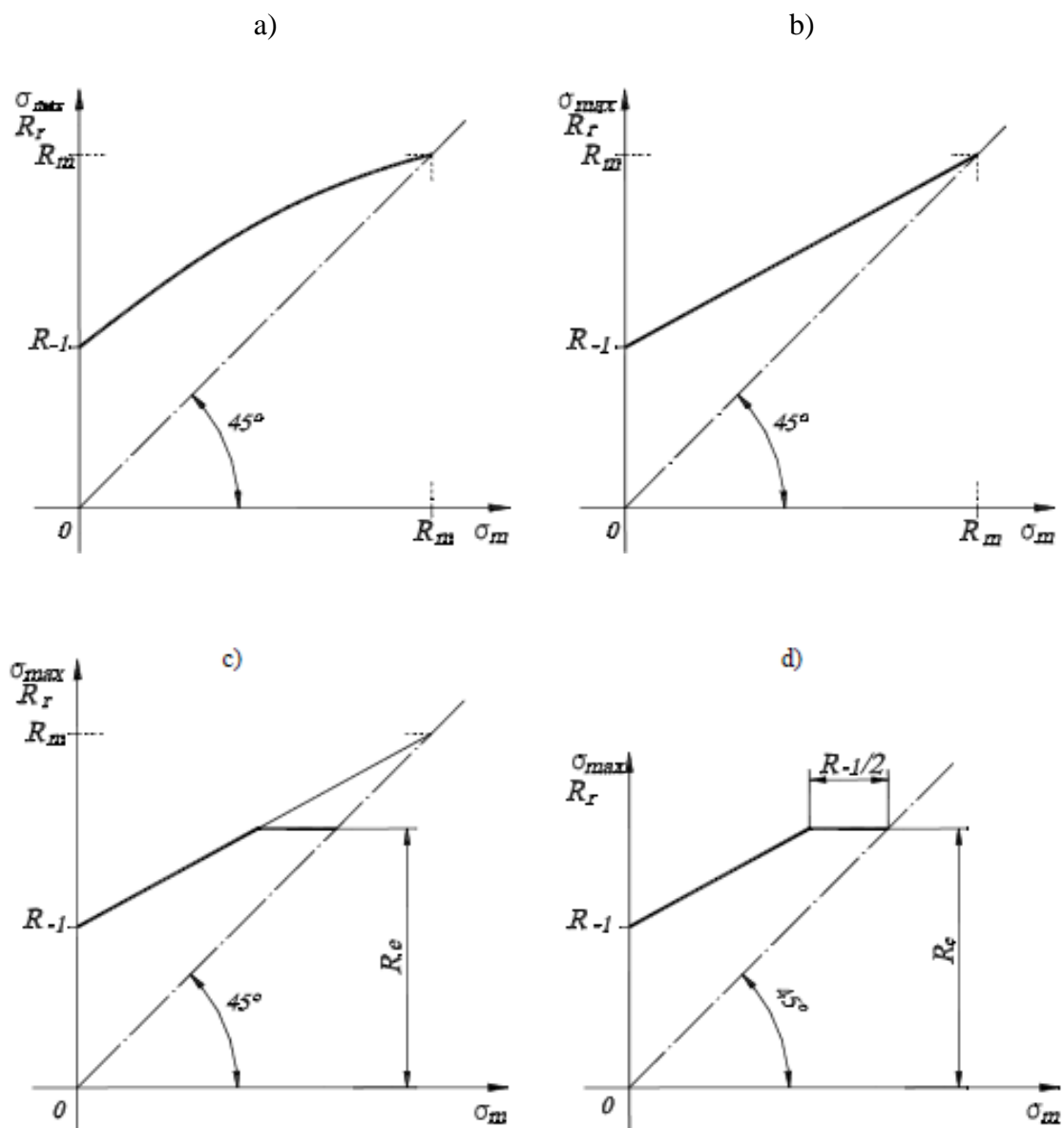
Budući da porastom radnih opterećenja strojnih dijelova koeficijent asimetrije ciklusa opterećenja ostaje sačuvan, a ako odziv strojnog dijela na ta opterećenja ne sadrži značajnije vibracije, onda i koeficijent asimetrije ciklusa napreznja ostaje sačuvan. Na temelju toga može se ustvrditi da maksimalne vrijednosti napreznja rastu po pravcu $r = const$. Zbog toga se taj pravac naziva pravcem opterećenja.

Granično napreznje tj. dinamička čvrstoća za taj r se također nalazi na tom pravcu. Kako se ona nalazi i na gornjoj konturi Smithovog dijagrama, očito je da se trajna dinamička čvrstoća za određeni koeficijent asimetrije ciklusa napreznja određuje kao presjecište pravca opterećenja $r = const$ i linije trajne dinamičke čvrstoće $R_r = f(R_m)$, slika 4.4c.



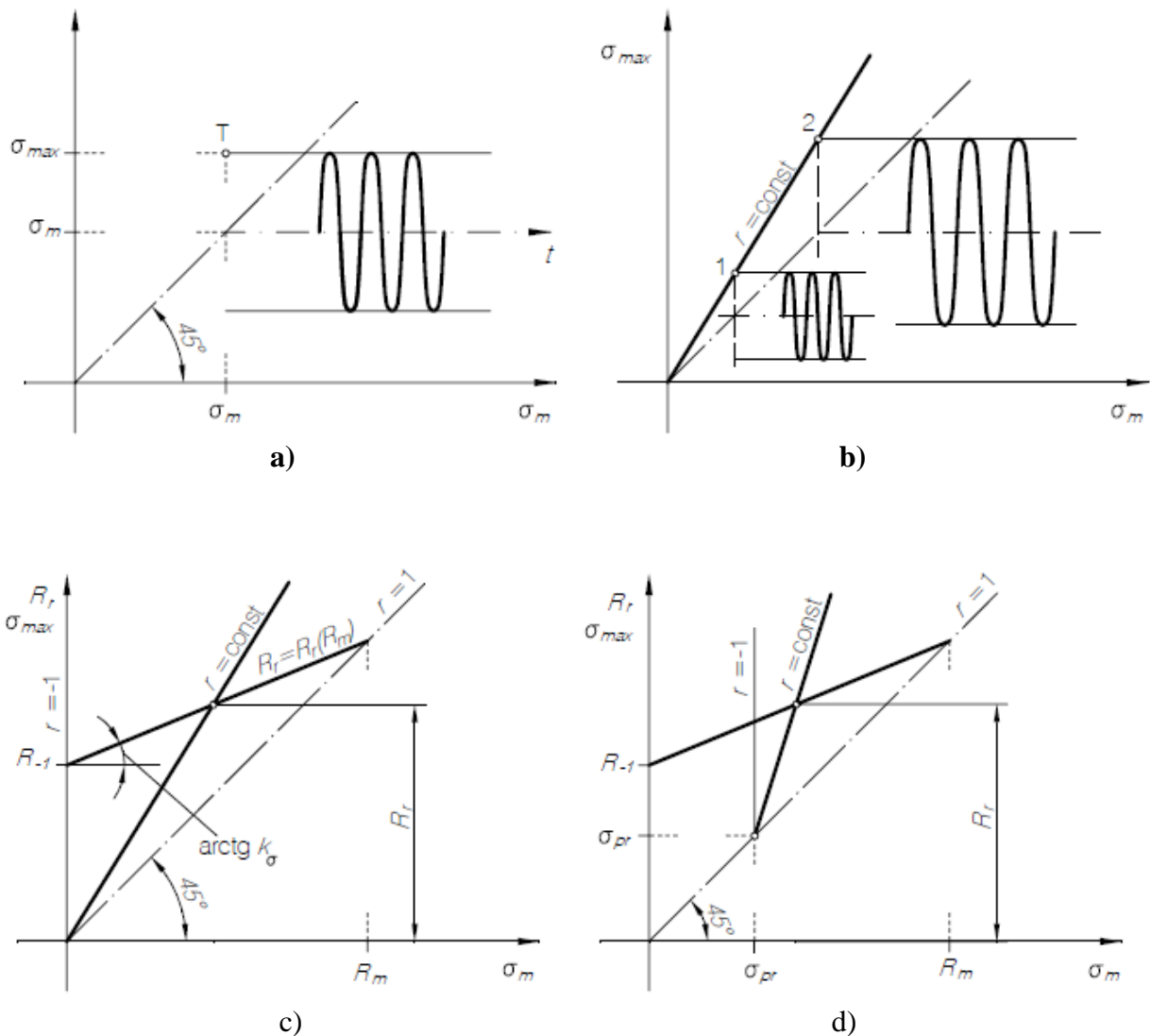
Slika 4.2 Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće

a) za različite vrste pogona napreznja, b) konstrukcija Smithovog dijagrama za poznate tri karakteristike čvrstoće: R_{-1} , R_0 i R_e



Slika 4.3 Neki od načina aproksimacije linije trajne dinamičke čvrstoće
 a) Gerberova parabola, b) Goodmanova linija, c) Goodmanova linija presječena granicom tečenja, d) pravac pod definiranim kutem ograničen granicom tečenja

Ako je strojni dio prije početka eksploatacije stroja prednapregnut statičkim naprezanjem σ_{pr} (npr. pritezanjem vijčanog spoja, navlačenjem glavine na vratilo, ugradnjom predopruguje opruge, od zaostalih naprezanja od zavarivanja itd.), onda proces njegovog opterećenja ne počinje od ishodišta dijagrama, već od točke $(\sigma_{pr}, \sigma_{pr})$ dalje pravcem $r = const$ (slika 4.4d), koji je pod istim kutem $\{\arctan[2/(1+r)]\}$ kao i prije. Trajna dinamička čvrstoća za ovaj r je naravno, opet presjecište pravca opterećenja i iste linije trajne dinamičke čvrstoće $R_r = f(R_m)$ Smithovog dijagrama.



Slika 4.4 : Osnovni principi Smithovog dijagrama

gdje je

a) jedna točka - jedno cikličko naprezanje, b) pravac kroz ishodište - pravac opterećenja - niz različitih cikličkih naprezanja iste asimetrije ciklusa c) dinamička čvrstoća za ciklička naprezanja s koeficijentom asimetrije ciklusa r jednaka je ordinati presjeka pravca opterećenja i linije odgovarajuće dinamičke čvrstoće, d) u prisustvu statičkog prednaprezanja σ_{pr} ishodište pravca opterećenja je pomaknuto u točku $(\sigma_{pr}, \sigma_{pr})$, dok mu nagib ostaje isti.

Za opći slučaj opterećenja jednadžba pravca opterećenja u Smithovom dijagramu glasi

$$\sigma_{max} = \sigma_{pr} + \frac{2}{1+r}(\sigma_m - \sigma_{pr}) \quad (4.2)$$

a jednadžba linije trajne dinamičke čvrstoće za shematizirani Smithov dijagram (tj. za pravac)

$$R_r = R_{-1} + k_\sigma \cdot \sigma_m \quad (4.3)$$

gdje je

- R_r - ordinata linije trajne dinamičke čvrstoća materijala u Smithovom dijagramu (trajna dinamička čvrstoća za srednje naprezanje ciklusa σ_m),
- R_{-1} - trajna dinamička čvrstoća materijala za koeficijent asimetrije ciklusa $r = -1$,
- σ_m - srednje naprezanje ciklusa,
- k_σ - koeficijent smjera linije trajne dinamičke čvrstoće u Smithovom dijagramu,
- R_0 - trajna dinamička čvrstoća materijala za koeficijent asimetrije ciklusa $r = 0$.

U tom slučaju ordinata presjecišta ovih dvaju pravaca daje vrijednost trajne dinamičke čvrstoće materijala za proizvoljni koeficijent asimetrije ciklusa radnih naprezanja i statičko prednaprezanje σ_{pr}

$$R_r = \frac{2}{2 - k_\sigma(1+r)} R_{-1} + \frac{1-r}{2 - k_\sigma(1+r)} k_\sigma \sigma_{pr} \quad (4.4)$$

Ipak, u najvećem broju slučajeva strojni dijelovi nisu statički prednapregnuti, pa se ovaj izraz (4.4) znatno pojednostavljuje, jer nestaje drugi član.

Na isti način kako se formirao Smithov dijagram za neograničenu trajnost tj. za trajnu dinamičku čvrstoću, formira se i za proizvoljnu ograničenu trajnost N . Pri tome najveća vrijednost srednjeg i maksimalnog naprezanja ostaje statička čvrstoća, dok se vremenska dinamička čvrstoća za trajnost od N ciklusa asimetrije r određuje prema jednadžbi Wöhlerove krivulje

$$R_{rN} = R_r (N_{gr} / N)^{1/m} \quad (4.5)$$

gdje je

- R_{rN} - dinamička čvrstoća materijala za koeficijent asimetrije ciklusa r i za trajnost od N ciklusa,
- N_{gr} - broj ciklusa na prelazu između vremenske i trajne dinamičke čvrstoće,
- N - trajnost u brojevima ciklusa.

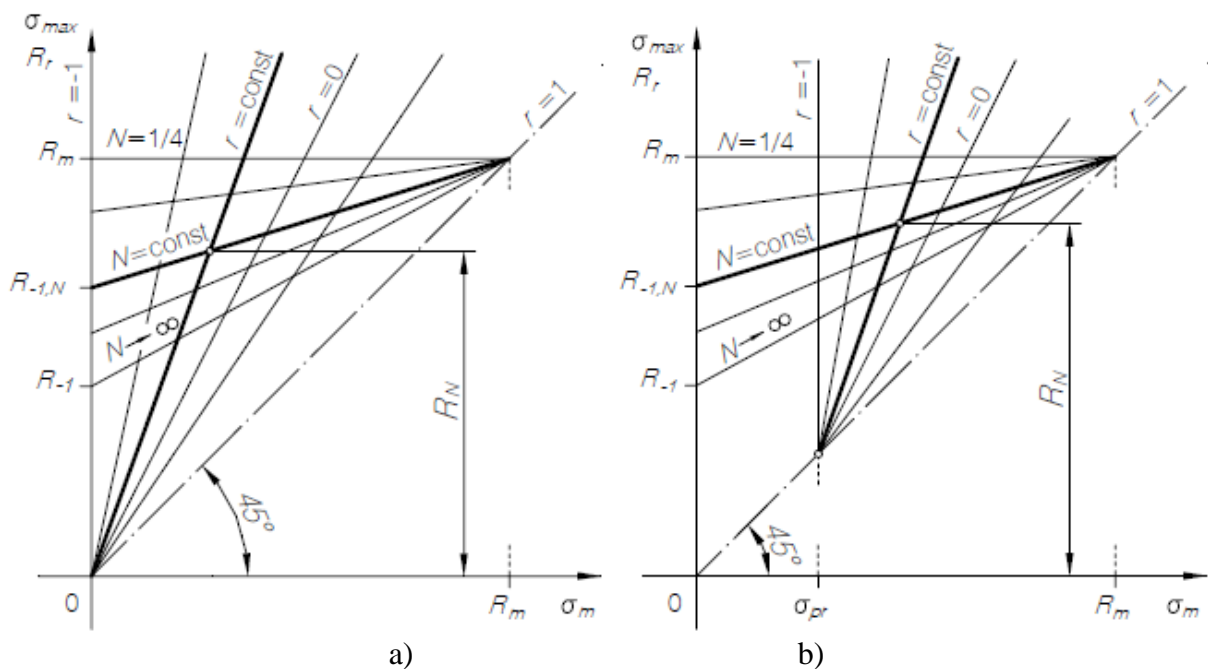
Obično je poznata trajna dinamička čvrstoća R_{-1} , pa izraz 4.5 prelazi u

$$R_{-1N} = R_{-1} (N_{gr} / N)^{1/m} \quad (4.6)$$

- R_{-1N} - dinamička čvrstoća materijala za koeficijent asimetrije ciklusa $r = -1$ i za trajnost od N ciklusa.

Linije vremenskih dinamičkih čvrstoća dakle povezuju točke $(0, R_{-1N})$ i (R_m, R_m) i u stvarnosti tim manje odstupaju od pravca što je trajnost manja. Za teoretski najmanju trajnost od $N = 1/4$ ciklusa (statičko opterećenje), ova linija je horizontalni pravac, tj. mjerodavna karakteristika čvrstoće postaje statička čvrstoća, slika 4.5. Za proizvoljnu trajnost N , dinamička čvrstoća se dobiva na isti način kao i za neograničenu trajnost, to je ordinata presjecišta istog pravca opterećenja i linije vremenske dinamičke čvrstoće, odnosno

$$R_{rN} = \frac{2}{2 - k_\sigma(1+r)} R_{-1N} + \frac{1-r}{2 - k_\sigma(1+r)} k_\sigma \sigma_{pr} \quad (4.7)$$



Slika 4.5 Određivanje dinamičke čvrstoće za ograničenu trajnost N materijala izloženog cikličkim naprezanjima s koeficijentom asimetrije ciklusa r , **a)** u odsustvu statičkog prednaprezanja **b)** uz statičko prednaprezanje σ_{pr}

5. Metode ispitivanja dinamičkih ispitivanja

5.1 Uvod

Odrediti početno opterećenje kojim će se ispitivati novi uzorak nije jednostavno. Uzorci ispitivanja mogu izdržati veliki broj ciklusa ili puknuti prerano. Prvih nekoliko uzoraka se ispituje da bi se odredio raspon opterećenja za određeni životni vijek.

Prvi način je da se više ispitivanih uzoraka optereti s različitim opterećenjima, te očita vrlo gruba *S-N krivulja*.

Drugi način je *stepenasta metoda*. Ova metoda se započinje ispitivanjem uzorka na pretpostavljenom opterećenju, ako uzorak pukne prije željenog vijeka trajanja mora se smanjiti opterećenje, a ako ne pukne onda se opterećenje poveća. Stepenasta metoda brzo se prebacuje na srednje opterećenje određenog vijeka trajanja. Međutim, vidljivo je da su preliminarna ispitivanja jako skupa i dugotrajna. Locati-jeva metoda može biti upotrebljena za značajno smanjenje vremena i troškova, pošto zahtijeva samo jedan testni uzorak.

Kao što je za očekivati, Locati-jeva metoda je nepreciznija i manje pouzdana u usporedbi s ostale dvije. Pretpostavkom nagiba, Locati-jeva metoda omogućava grubo određivanje *S-N krivulje*. Nijedna od ovih pretpostavki nije zajamčena. Pogreška mjerenja metode može biti do 75% što ograničava strojarsku primjenu. Pogreška je u većini slučajeva zbog loše procijene nagiba *S-N krivulje*.

Postavlja se pitanje kako što učinkovitije dobiti prvu grubu procjenu čvrstoće materijala unaprijed već određenim životnim vijekom materijala, s minimalnim znanjem o *S-N krivulji*. Umjesto dobivanja grube procijene *S-N krivulje* s pretpostavljenim nagibom, pokazano je da Locati-jeva metoda može dati točku na *S-N ravnini*, koja predstavlja sjecište svih mogućih *S-N krivulja*.

Drugim riječima, takva točka je najpreciznija i pouzdana za uporabu kod jednog ispitivanog uzorka, pošto ne ovisi o nagibu *S-N krivulje* i stoga je eliminiran jedan izvor pogrešaka. Prikazana metoda se uspješno primjenjuje prilikom ispitivanja zavarenih konstrukcija kod cestovnih automobila.

5.2 S-N krivulja

Na *Log(N)-Log(S)* ravnini, *S-N krivulja* često je vrlo blizu ravnoj liniji i može biti izražena u obliku

$$\text{Log}(S)=A+B\text{log}(N) \quad (5.1)$$

u kojem je *N* vijek trajanja materijala (opterećenja), *S* čvrstoća materijala koja se može odnositi na maksimalne vrijednosti konstantne amplitude cikličkog naprezanja i opterećenja. *A* i *B* su konstante dobivene na temelju krivulje iz ispitnih podataka. Konstanta *B* je nagib.

Da bi se odredila srednja *S-N krivulja* ispitivanja, minimalno se deset uzoraka ispituje na nekoliko razina naprezanja. Konstanta *A* i nagib *B* okarakterizirani su *S-N krivuljom*. *S-N*

krivulja ne mora biti ravna linija $\text{Log}(N)\text{-Log}(S)$ ravnine, to je dobra aproksimacija u slučajevima automobilske industrije.

5.3 Preliminarna ispitivanja

Broj ciklusa puknutog uzorka obično je zavisna varijabla, dok je opterećenje ili naprezanje S nezavisna varijabla. U nekim situacijama broj ciklusa N je već unaprijed određen, a potrebno je odrediti naprezanje i opterećenje S . Ovaj slučaj je potrebno proučiti. Točnije ono što se traži nije točnost ili preciznost statistike nivoa naprezanja ili opterećenja nego prva gruba procijena srednje vrijednosti za zadani broj ciklusa opterećenja.

Preliminarna ispitivanja su bitna u $P\text{-}S$ ispitivanju gdje P označava vjerojatnost puknuća, u kojoj je vijek trajanja već unaprijed određen i fiksiran. Time se određuje odnos naprezanja naspram vjerojatnosti puknuća materijala. Nekoliko uzoraka može biti prvo ispitano kao i kod $S\text{-}N$ testova, pri srednjem opterećenju i naprezanju oko željenog vijeka trajanja.

Preliminarna ispitivanja su također bitna za rutinska $S\text{-}N$ ispitivanja, kako bi se utvrdi odgovarajući nivo opterećenja. Za uspješnu provedbu ispitivanja potrebno je barem približno poznavati nivo opterećenja.

5.4 Stepenasta metoda

Stepenasta metoda je popularna u određivanju srednjih vrijednosti i standardnih odstupanja od granice zamora materijala ili izdržljivosti. Metoda je preporučena od strane ASTM-a i od evropskih standarda. Koristeći ovu metodu, prvi uzorak se ispituje na srednji nivo naprezanja koji odgovara određenom vijeku trajanja. Ukoliko uzorak pukne prije određenog ciklusa, sljedeći uzorak se ispituje na nižem nivou naprezanja, a ako zadovolji, naprezanje se povećava za isti iznos za sljedeći uzorak. Ispitivanje traje sve dok se ne ispita 15-30 epruveta. Ova metoda se može koristiti za određivanje čvrstoće materijala na unaprijed određenom vijeku trajanja.

Ova metoda može biti alternativa preliminarnom ispitivanju. S obzirom na ispitivanje koje teži srednjoj čvrstoći materijala, kao i predispitno ispitivanje, može biti jako skupo i dugotrajno, ovisno o tome koliko uzoraka se ispituje. U biti, ako je srednji nivo naprezanja na kraju vijeka trajanja zadovoljen, postavlja se pitanje da li je ova metoda prikladna zbog samo malo bolje preciznosti. $S\text{-}N$ ispitivanja su znatno pogodnija.

5.5 Locati metoda

Ova metoda omogućava pronalaženje grubu procjenu čvrstoće materijala, uz zadani broj ciklusa. Ovo ispitivanje je ispitivanje jednog uzorka.

Metoda zahtijeva da nagib $S\text{-}N$ *krivulje* bude približno poznat prije ispitivanja. Prvo se crta $S\text{-}N$ *krivulja* na temelju poznatog ili pretpostavljenog nagiba. Testiranje započinje odabirom broja ciklusa na početnom nivou naprezanja S_0 koji je ispod predviđene čvrstoće materijala određenog vijeka trajanja. Ispitivanje se nastavlja završetkom istog broja ciklusa s fiksnim naprezanjem prirasta i tako dalje, sve dok uzorak ne pukne.

Za analiziranje rezultata ispitivanja uglavnom se koristi Miner-ovo pravilo. Ako se $S\text{-}N$ *krivulja* točno pretpostavi, rezultati ispitivanja će biti

$$\sum \left(\frac{n}{N} \right) = 1 \quad (5.2)$$

gdje je N broj ciklusa dobiven pretpostavkom S - N krivulje koja odgovara ispitanoj nivou napreznja i opterećenja. Na temelju izračunatih vrijednosti (5.2) od tri pretpostavljene krivulje, čvrstoća materijala se može dobiti interpolacijom već unaprijed određenim brojem ciklusa.

Locati metoda je bazirana na nagibu S - N krivulje. Ukoliko nagib krivulje nije poznat, procijenjena čvrstoća materijala će ovisiti o varijaciji broja opterećenja n za svaki korak, početnom nivou napreznja S_o i povećanju napreznja ΔS . Prema ovoj metodi početak ispitivanja je na onom nivou napreznja koji je manji od čvrstoće materijala za zadani vijek trajanja. U praksi to ostaje neizvjesno do kraju ispitivanja.

5.6 Modificirana Locati metoda

Locati-jevi rezultati ispitivanja mogu se analizirati grafički pomoću metode pogreške prikazane na slici 5.1. Pomoću sljedećih jednadžbi može se odrediti traženo napreznje ili amplituda opterećenja. Prema Miner-ovom zakonu komulativnog oštećenja mora biti

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5.3)$$

gdje je m broj koraka opterećenja do pucanja uzorka. Iz jednadžbe (5.1) dobiva se:

$$N_i = 10^{-A/B} \cdot S_i^{1/B} \quad (5.4)$$

pod pretpostavkom da je nagib B poznat ili pretpostavljen, a uvrštenjem jednadžbe (5.4) u (5.3) dobiva se:

$$A = -B \text{Log} \left(\sum_{i=1}^m n_i / S_i^{1/B} \right), \quad (5.5)$$

da se dinamička izdržljivost materijala za određeni broj ciklusa može računati iz jednadžbe (5.1).

Iako je Locati metoda namijenjena za procjenu dinamičke izdržljivosti materijala određenog vijeka trajanja, ona daje čitavu S - N krivulju. Ako se pretpostavi novi nagib, metoda će dati novu procijenjenu S - N krivulju.

Točka presjecišta dvije S - N krivulje se dobiva pomoću izraza:

$$A_1 + B_1 \text{Log}(N) = A_2 + B_2 \text{Log}(N) \quad (5.6)$$

što daje

$$N = 10^{-(A_2 - A_1)/(B_2 - B_1)} \quad (5.7)$$

Dinamička izdržljivost točke presjecišta može se dobiti pomoću jednadžbe (5.1). Ova točka je neovisna o nagibu ukoliko B_1 i B_2 predstavljaju sve moguće nagibe.

Pretpostavimo da ćemo imati nagib u širokom području (recimo od -0.3 do -0.1). Procijenjena $S-N$ krivulja s nagibom unutar tog područja je izračunata i nacrtana na slici 5.2. Vidljivo je da postoje brojevi ciklusa pri kojima procijenjena čvrstoća materijala dostiže svoj minimum. Pri tom broju ciklusa, područje procijenjene čvrstoće materijala je toliko malo, da na grafu izgleda kao točka presjecišta svih mogućih $S-N$ krivulja. Ta točka je najpouzdanija i najpreciznija pošto ne zavisi o nagibu, tako da se eliminira jedan izvor pogreške Locati-jeve metode. Tu točku ćemo zvati najpogodnijom točkom, a N_{bfp} i S_{bfp} ćemo označiti kao vijek trajanja, odnosno čvrstoća materijala.

Najpogodnija točka može se približno očitati s grafa, koji je baziran na rezultatima ispitivanja, slika 5.2. Izračunavanje najpogodnije točke dato je sljedećim jednadžbama:

$$B_k = B_{\max} + 0.2(k-1)(B_{\min} - B_{\max}) \quad k=1,3,6 \quad (5.8)$$

$$A_k = -B_k \text{Log} \left(\sum_{i=1}^m n_i / S_i^{1/B_k} \right) \quad k=1,3,6 \quad (5.9)$$

$$\text{Log}(N_{1,6}) = \frac{A_1 - A_6}{B_1 - B_6} \quad (5.10)$$

$$\text{Log}(S_{1,6}) = A_1 + B_1 \text{Log}(N_{1,6}) \quad (5.11)$$

$$\text{Log}(S_3) = A_3 + B_3 \text{Log}(N_{1,6}) \quad (5.12)$$

što daje:

$$\text{Log}(N_{bfp}) = \text{Log}(N_{1,6}) \quad (5.13)$$

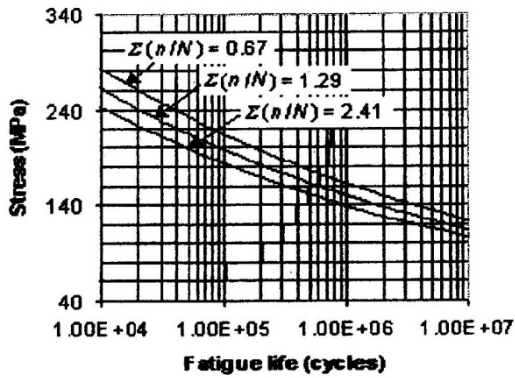
$$\text{Log}(S_{bfp}) = 0.5[\text{Log}(S_{1,6}) + \text{Log}(S_3)] \quad (5.14)$$

gdje B_{\min} i B_{\max} predstavljaju granice raspona nagiba.

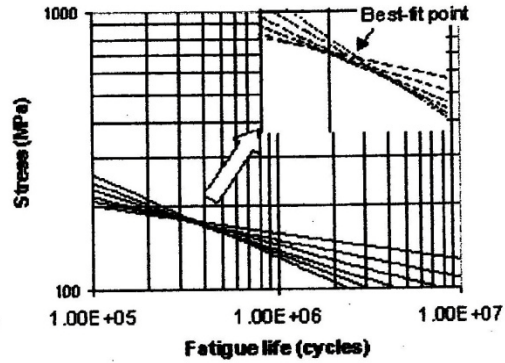
Locati ispitivanja su provedena na početnom nivou naprezanja S_o s fiksnim povećavanjem ΔS i brojem ciklusa n svakog koraka. Nepoznanica završetka ispitivanja su brojevi koraka m i

broj ciklusa n_m zadnjeg koraka. Najpogodnija točka je funkcija od m i n_m s datim vrijednostima S_o , ΔS i n .

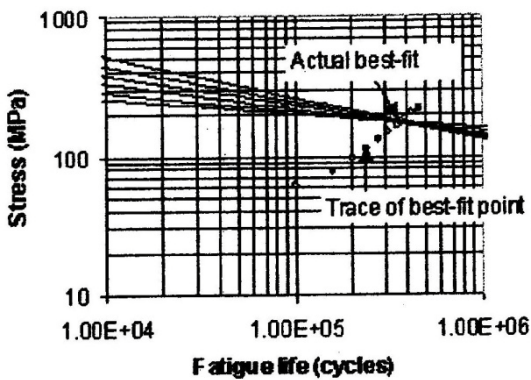
Pretpostavljajući da će ispitani uzorak puknuti na k -om koraku, možemo izračunati vijek trajanja N_k i čvrstoću materijala S_k najpogodnije točke. Najpogodnija točka s $k=0, 1, 2, \dots, 9$, prikazana je na slici 5.3.



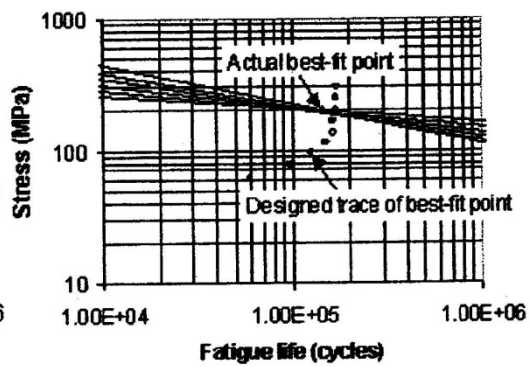
Slika 5.1: Locati metoda



Slika 5.2: Najpogodnija točka



Slika 5.3: Tragovi najpogodnije točke



Slika 5.4: Metoda pogreške

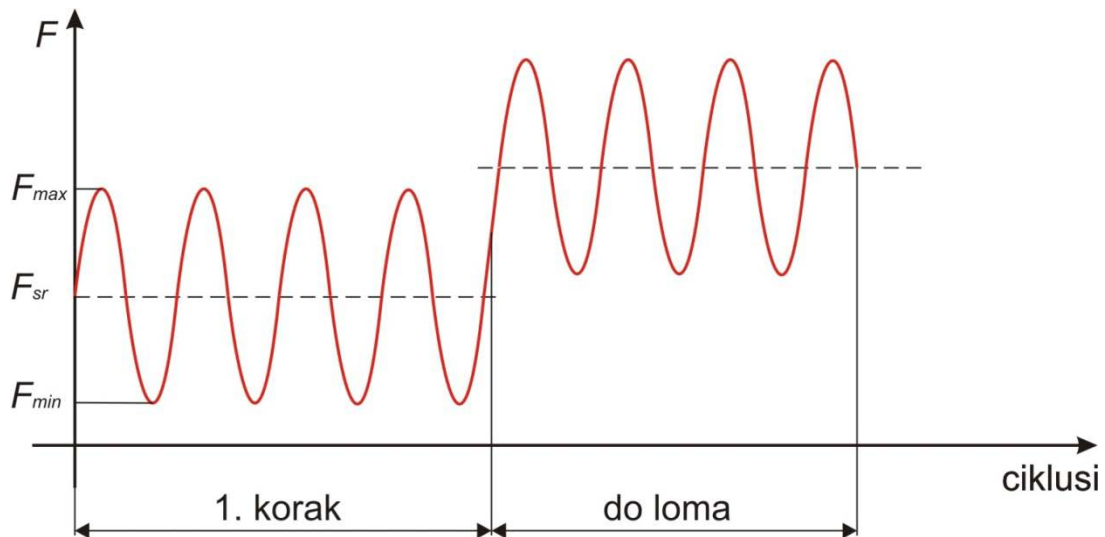
6. Provedba eksperimenta

6.1 Ispitni uređaj i oblik epruvete

Ispitivanja su provedena na servohidrauličkoj umaralici LFV-50 HH (slika 6.1) s maksimalnom silom od 50 KN (proizvođač Walter Bai, Švicarska). Prije ispitivanja u programu umaralice unose se dimenzije epruvete i parametri ispitivanja, odnosno oblik i visina opterećenja te frekvencija. Za opterećenje je odabran sinusoidni oblik (slika 6.2).

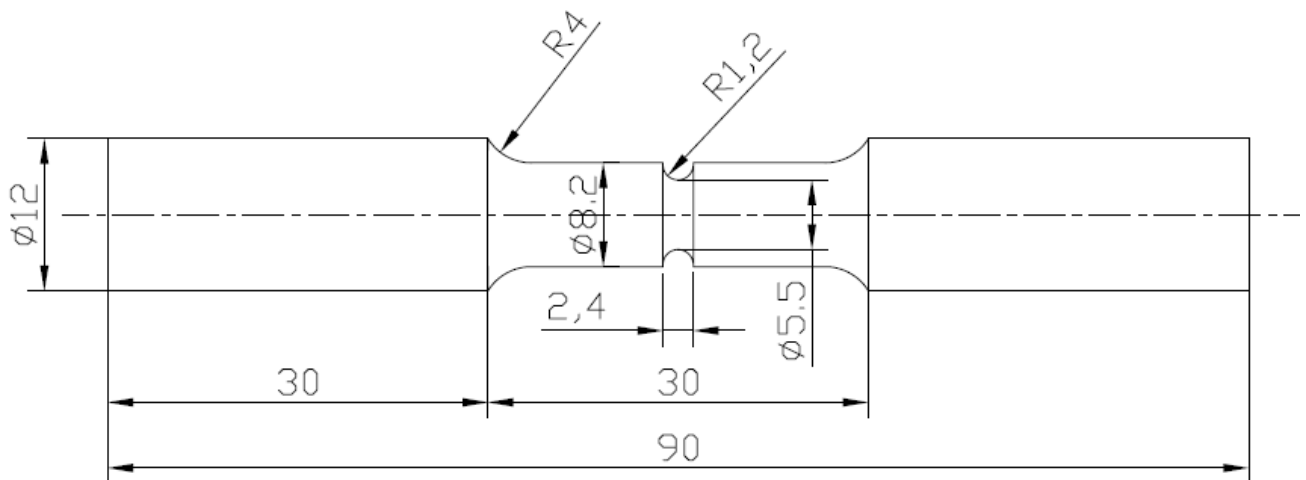


Slika 6.1 Servohidraulička umaralica LFV-50 HH



Slika 6.2 Sinusoidalni oblik opterećenja

Određivanje trajne zarezne čvrstoće materijala X21CrMoV12-1 provedeno je na 18 standardnih epruveta kružnog poprečnog presjeka s u-utorom. S ciljem utvrđivanja utjecaja kvalitete površinske obrade na dinamičku izdržljivost devet epruveta je izrađeno tokarenjem standardne kvalitete, a devete epruveta je dodatno polirano. Oblik i dimenzije epruveta prikazane su na slici 6.3 i slici 6.4.



Slika 6.3 Dimenzije epruvete s u-utorom



Slika 6.4 Nepolirana epruveta a) prije ispitivanja, b) nakon ispitivanja

6.2 Parametri ispitivanja

Prije dinamičkog ispitivanja statičkim vlačnim pokusom određena je vlačna čvrstoća epruvete i ona je iznosila 1000 MPa. Ovaj podatak je bio neophodan za definiranje opterećenja pri cikličkom ispitivanju, koje je provedeno s pet različitim opterećenja. Iznosi ovih opterećenja za nepolirane (NP) i polirane epruvete dane su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Iznosi opterećenja poliranih i nepoliranih epruveta

Epruveta	Max. opterećenje kN	Min. opterećenje kN
NP 1	950	47,5
NP 2	950	47,5
NP 3	900	45
NP 4	900	45
NP 5	850	42,5
NP 6	450	22,5
NP 7	450	22,5
NP 8	500	25
NP 9	500	25
P 1	950	47,5
P 2	950	47,5
P 3	900	45
P 4	900	45
P 5	850	42,5
P 6	450	22,5
P 7	450	22,5
P 8	500	25
P 9	500	25

Za svaku epruvetu iz tablice 6.1 je predviđeno da se ispitivanje provede u deset koraka i frekvencijom od 10 Hz, i to na sljedeći način. U prvom koraku (prvi nivo opterećenja) opterećenje je jednako maksimalnom opterećenju prema tablici 6.1. Ukoliko epruveta nije pukla nakon određenog broja ciklusa u sljedećem koraku se maksimalno opterećenje povećava za 50 MPa. Opterećenje bi se na taj način povećavalo dok epruveta ne bi pukla, odnosno do maksimalnog predviđenog desetog koraka (nivoa opterećenja) u kojem opterećenje iznosi 450 MPa više od početnog maksimalnog opterećenja.

Tako npr. za nepoliranu epruvetu NP 1 sa sljedećim karakteristikama

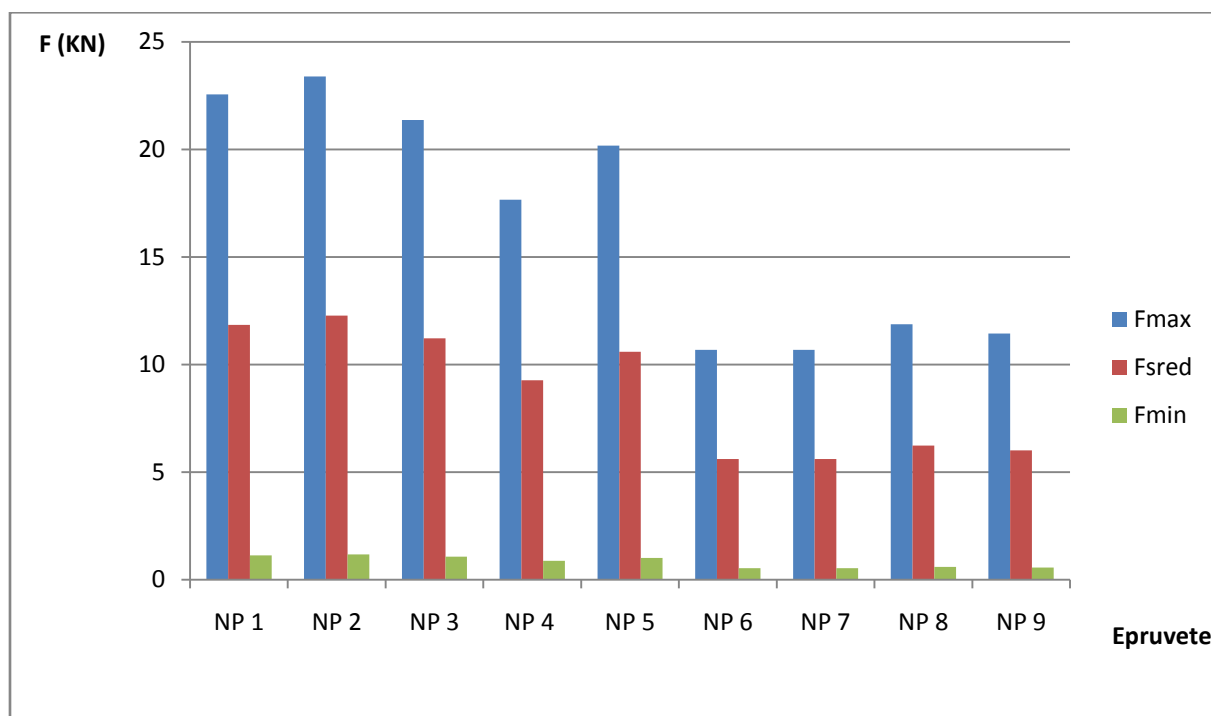
- dimenzije : ø 8,2
- utor: ø 5,5
- površina presjeka utora: 23,74625 mm²
- max. opterećenje: 950 (MPa)
- min. opterećenje: 47,5 (MPa)
- broj ciklusa: 2525

iznosi opterećenja po koracima dani su u tablici 6.2. Da bi se ispitivanje moglo provesti na taj način napisan je programski kod koji je dan u prilogu rada.

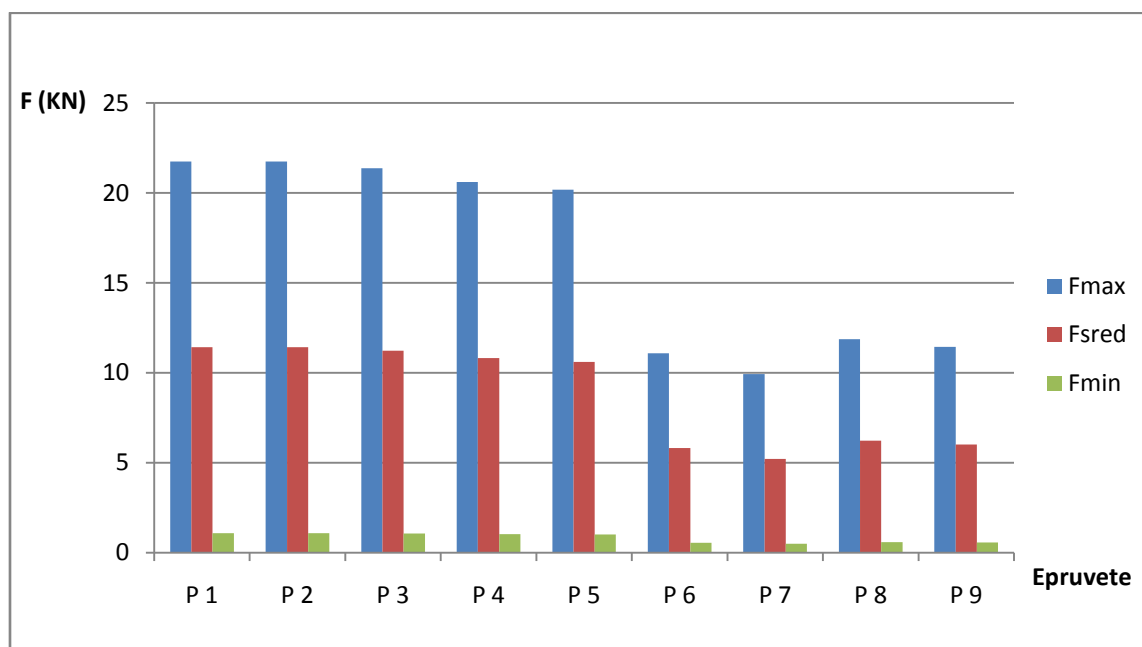
Tablica 6.2 Iznosi opterećenja za nepoliranu epruvetu NP 1

Broj koraka	Max. sila kN	Srednja sila kN	Min. Sila kN	Predviđeni broj ciklusa
1. Korak (max. opt.)	22,5589375	11,84344219	1,127946875	70 000
2. Korak (max.opt.+50MPa)	23,74625	12,46678125	1,1873125	20 000
3. Korak (max. opt. +100MPa)	24,9335625	13,09012031	1,246678125	20 000
4. Korak (max. opt. + 150MPa)	26,120875	13,71345938	1,30604375	20 000
5. Korak (max. opt. + 200MPa)	27,3081875	14,33679844	1,365409375	20 000
6. Korak (max. opt. + 250MPa)	28,4955	14,9601	1,424775	20 000
7. Korak (max. opt. + 300MPa)	29,6828125	15,58347656	1,484140625	20 000
8. Korak (max. opt. + 350MPa)	30,870125	16,20681563	1,54350625	20 000
9. Korak (max. opt. + 400MPa)	32,0574375	16,83015469	1,602871875	20 000
10. Korak (max. opt. + 450MPa)	33,24475	17,45349375	1,6622375	20 000

Na isti način su određeni iznosi opterećenja i za ostale epruvete, a za sve polirane i nepolirane epruvete u prvom koraku prikazani su dijagramom na slici 6.5 i slici 6.6.



Slika 6.5 Iznos opterećenja u prvom koraku za nepolirane epruvete



Slika 6.6 Iznos opterećenja u prvom koraku za polirane epruvete

6.3 Rezultati ispitivanja

6.3.1 Rezultati za pomake

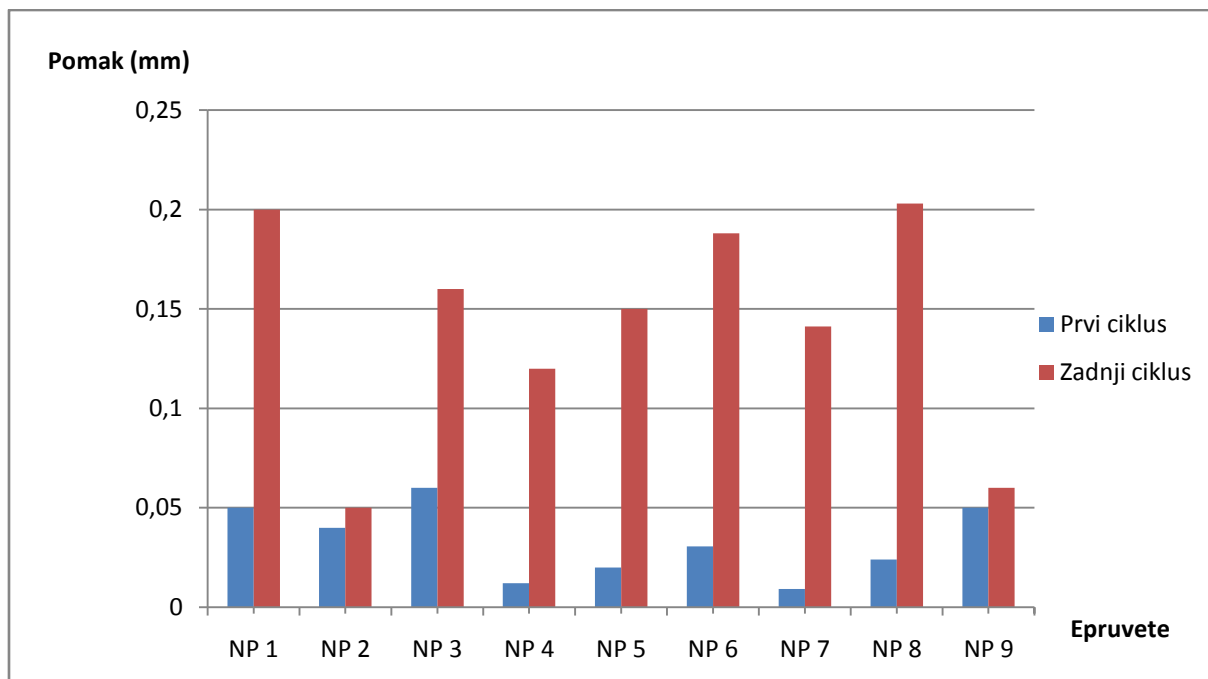
Rezultati za maksimalne pomake S_{\max} u prvom i zadnjem ciklusu opterećenja za nepolirane epruvete dani su u tablici 6.3 i dijagramom na slici 6.7, a za polirane epruvete u tablici 6.4 i dijagramom na slici 6.8.

Iz rezultata je vidljivo da je rasipanje rezultata znatno veće kod nepoliranih epruveta i u prvom i u zadnjem ciklusu. Također je za primijetiti, da je razlika između pomaka u zadnjem i prvom ciklusu vrlo neujednačena što je posebno izraženo kod epruveta NP 2 i NP 7.

Za razliku od nepoliranih kod poliranih epruveta rasipanje rezultata je znatno manje u oba ciklusa. Rezultati su grupirani, tako da jednu grupu predstavljaju rezultati dobiveni na epruvetama P 1 do P 5, a drugu grupu čine rezultati za epruvete P 6 do P 9. Rasipanje rezultata unutar tih grupa je vrlo malo kako u prvom tako i u zadnjem ciklusu.

Tablica 6.3 *Rezultati za maksimalne pomake u prvom i zadnjem ciklusu kod nepoliranih epruveta*

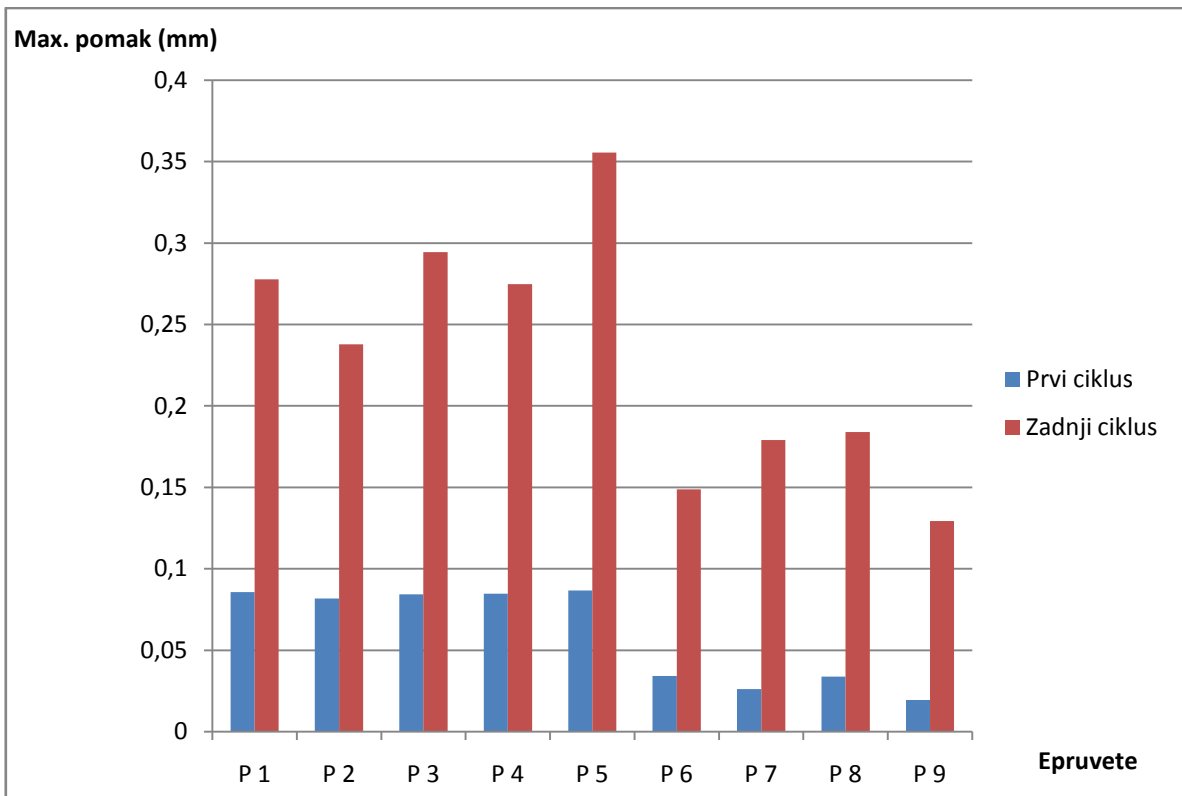
	Prvi ciklus	Zadnji ciklus	
Epruveta	S_{\max} mm	S_{\max} mm	$S_{\max p} / S_{\max z}$
NP 1	0,05	0,2	0.25
NP 2	0,04	0,05	0,8
NP 3	0,06	0,16	0,375
NP 4	0,012	0,12	0,1
NP 5	0,02	0,15	0,133
NP 6	0,0306	0,1881	0,1626
NP 7	0,0091	0,1411	0,0644
NP 8	0,024	0,203	0,118
NP 9	0,05	0,06	0,833



Slika 6.7 Maksimalni pomaci u prvom i zadnjem ciklusu kod nepoliranih epruveta

Tablica 6.4 Rezultati za maksimalne pomake u prvom i zadnjem ciklusu kod poliranih epruveta

	Prvi ciklus	Zadnji ciklus	
Epruveta	S_{max} mm	S_{max} mm	S_{maxp}/S_{maxz}
P 1	0,0857	0,2777	0,3086
P 2	0,0818	0,2378	0,3439
P 3	0,0844	0,2945	0,2865
P 4	0,0847	0,2747	0,3083
P 5	0,0866	0,3556	0,2435
P 6	0,0342	0,1488	0,2298
P 7	0,0261	0,1791	0,14572
P 8	0,0339	0,1839	0,1843
P 9	0,0194	0,1294	0,1499



Slika 6.8 Maksimalni pomaci u prvom i zadnjem ciklusu poliranih epruveta

6.3.2 Rezultati za broj ciklusa

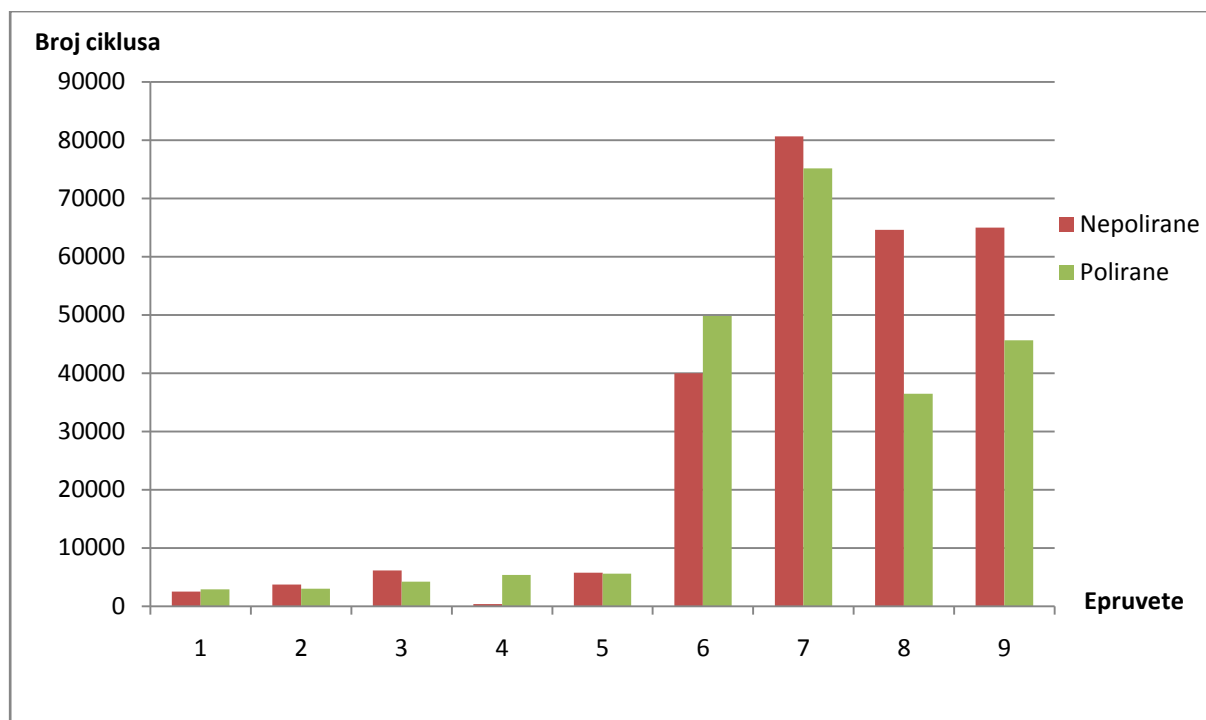
Rezultati za broj ciklusa do loma nepoliranih i poliranih epruveta dani su u tablicama 6.5 i 6.6 i dijagramom na slici 6.9. Iz rezultata je vidljivo da su sve epruvete pukle u prvom koraku, odnosno na prvom nivou opterećenja s izuzetkom epruveta NP 7 i P 7. Te epruvete su ujedno izdržale približno isti broj ciklusa. Najveća razlika u broju ciklusa je između epruveta NP 4 i P 4, kao i između epruveta NP 8 i P 8. Interesantno je da su nepolirane epruvete s izuzetkom već spomenute NP 4 izdržale približno isti broj ili znatno veći broj ciklusa od poliranih epruveta. Isto tako, nešto više pravilnosti je uočljivo kod poliranih nego kod nepoliranih epruveta.

Tablica 6.5 Rezultati za broj koraka i broj ciklusa do loma nepoliranih epruveta

Epruveta	NP 1	NP 2	NP 3	NP 4	NP 5	NP 6	NP 7	NP 8	NP 9
Broj koraka	1	1	1	1	1	1	2	1	1
Broj ciklusa	2525	3715	6143	373	5752	40020	80634	64611	65000

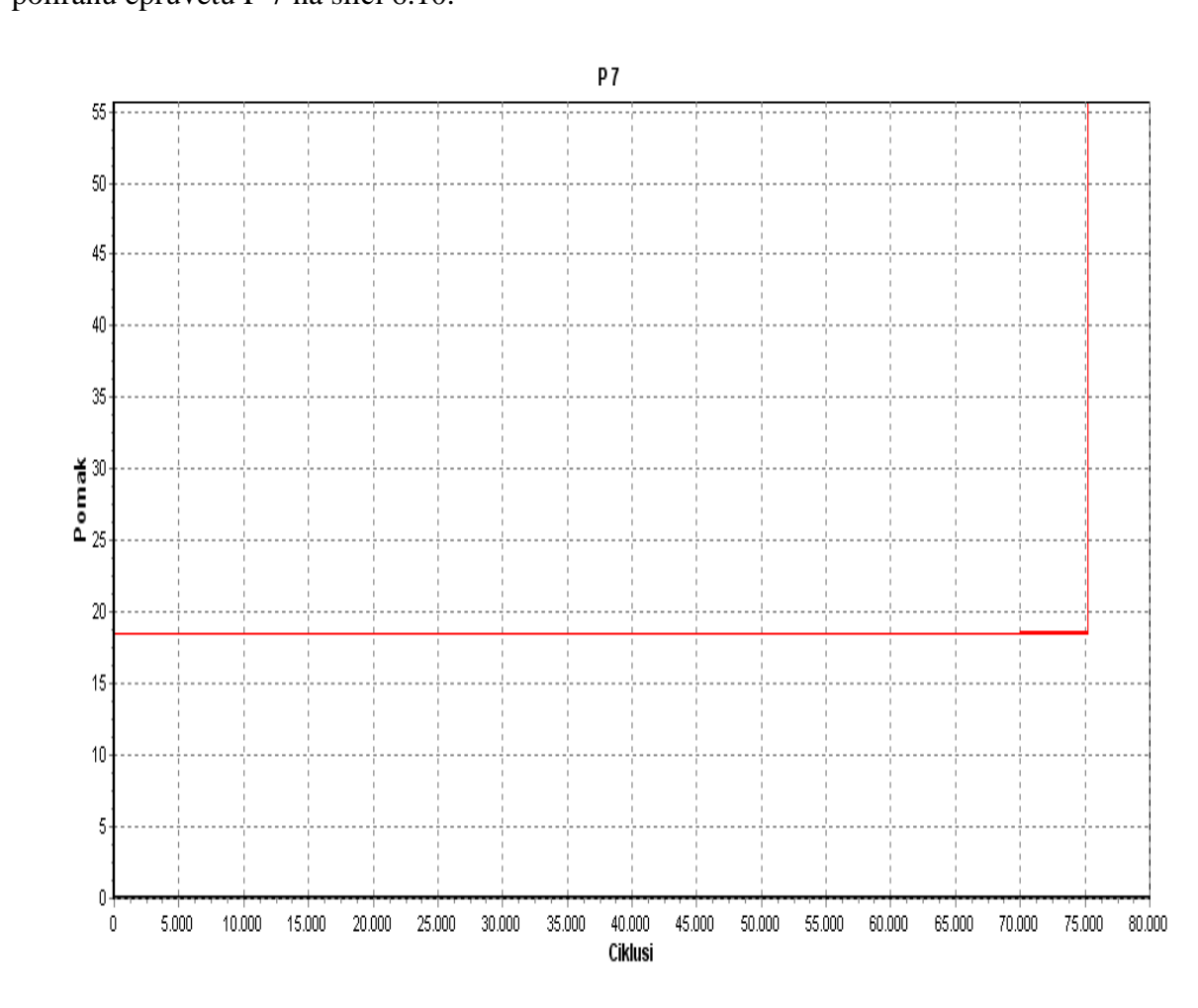
Tablica 6.6 Rezultati za broj koraka i broj ciklusa do loma poliranih epruveta

Epruveta	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9
Broj koraka	1	1	1	1	1	1	2	1	1
Broj ciklusa	2890	3027	4252	5395	5626	49849	75180	36480	45671



Slika 6.9 Broj ciklusa do loma kod nepoliranih i poliranih epruveta

Izgled dijagrama pomak-ciklus koji je karakterističan za sve ispitane epruvete prikazan je za poliranu epruvetu P 7 na slici 6.10.



Slika 6.10 Pomak-ciklus za poliranu epruvetu P 7

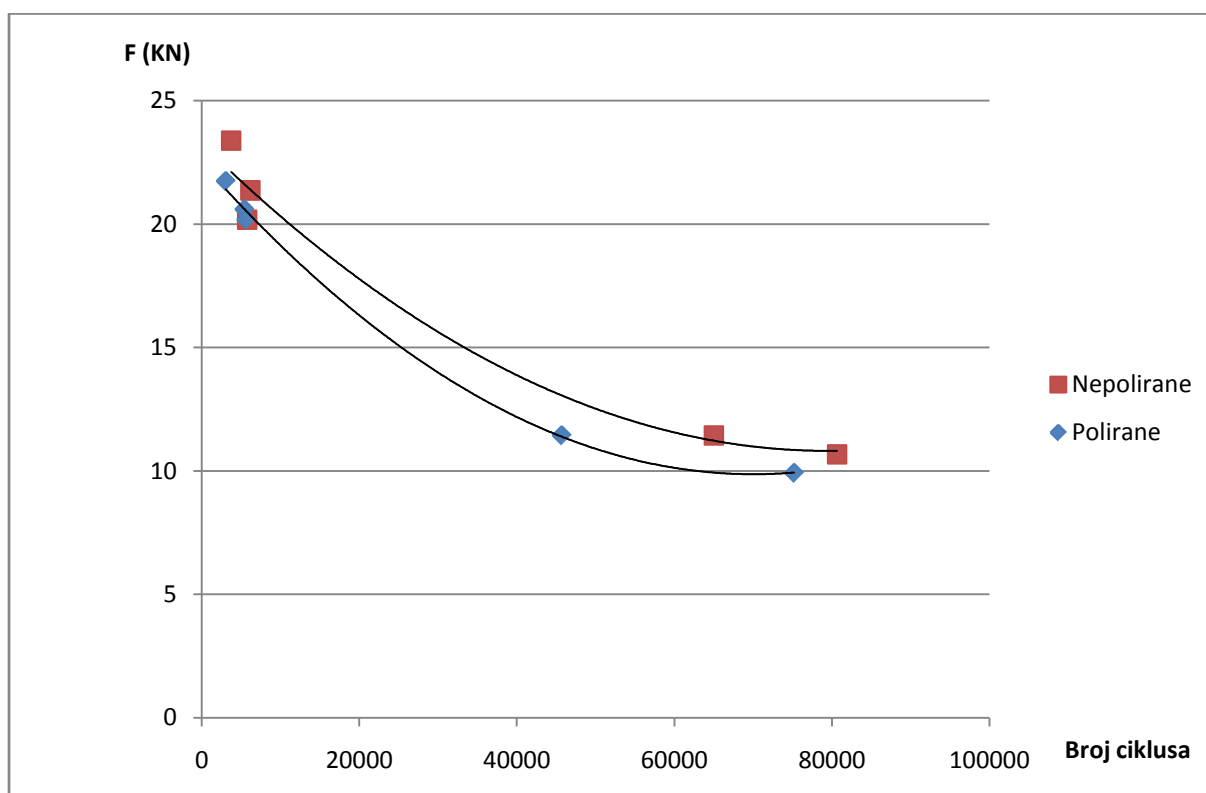
Rezultati za broj ciklusa do loma nepoliranih i poliranih epruveta dani su u tablicama 6.7 i 6.8, a Wöhlerove krivulje dobivene na temelju tih rezultata prikazane su dijagramom na slici 6.11. Iz tih krivulja je vidljivo da su nepolirane epruvete pri istom opterećenju izdržale veći broj ciklusa, što je suprotno od očekivanih rezultata. Ova pojava se djelomično može pripisati poliranju epruveta. S obzirom da su utori polumjera 1,2 mm, za pretpostaviti je da se tako mali utori nisu mogli ravnomjerno ispolirati, odnosno da su dijelovi površine utora ostali nepolirani ili su se čak tijekom poliranja oštetili. Takva oštećenja kod cikličkog opterećenja djeluje kao izraziti koncentratori naprezanja i znatno smanjuju broj ciklusa do loma.

Tablica 6.7 Opterećenje i broj ciklusa do loma nepoliranih epruveta

Epruveta	NP 2	NP 3	NP 5	NP 7	NP 9
Sila	23,386	21,3716	20,1843	10,6858	11,4453
Broj ciklusa	3715	6143	5752	80634	65000

Tablica 6.8 Opterećenje i broj ciklusa do loma poliranih epruveta

Epruveta	P 2	P 4	P 5	P 7	P 9
Sila	21,74607	20,60154	20,1843	9,92279	11,4453
Broj ciklusa	3027	5395	5626	75180	45671



Slika 6.11 Wöhler-ova krivulja za nepolirane i polirane epruvete

7. Zaključak

Cilj ovog rada bio je eksperimentalno odrediti trajnu zareznu čvrstoću materijala X21CrMoV12-1, koji se koristi za izradu turbinskih lopatica primjenom Locati-jeve metode. S ciljem određivanja utjecaja kvalitete površinske obrade na zareznu čvrstoću, ispitivanja su provedena na standardnim epruvetama okrugla presjeka s u-utorom.

Ispitivanja su provedena na servohidrauličkoj umaralici LFV-50 HH s maksimalnom silom od 50 KN. Prije ispitivanja u programu umaralice unose se dimenzije epruvete i parametri ispitivanja, odnosno oblik i visina opterećenja te frekvencija.

Određivanje trajne zarezne čvrstoće materijala X21CrMoV12-1 provedeno je na 18 standardnih epruveta kružnog poprečnog presjeka s u-utorom. S ciljem utvrđivanja utjecaja kvalitete površinske obrade na dinamičku izdržljivost devet epruveta je izrađeno tokarenjem standardne kvalitete, a devete epruveta je dodatno polirano. Prije dinamičkog ispitivanja statičkim vlačnim pokusom određena je vlačna čvrstoća epruvete i ona je iznosila 1000 MPa.

Iz rezultata pomaka epruvete je vidljivo da je rasipanje rezultata znatno veće kod nepoliranih epruveta i u prvom i u zadnjem ciklusu. Također je vidljivo, da je razlika između pomaka u zadnjem i prvom ciklusu vrlo neujednačena što je posebno izraženo kod epruveta NP 2 i NP 7.

Za razliku od nepoliranih kod poliranih epruveta rasipanje rezultata je znatno manje u oba ciklusa. Također je za primjetiti da su rezultati grupirani, tako da jednu grupu predstavljaju rezultati dobiveni na epruvetama P 1 do P 5, a drugu grupu čine rezultati za epruvete P 6 do P 9. Rasipanje rezultata unutar tih grupa je vrlo malo kako u prvom tako i u zadnjem ciklusu.

Iz dobivenih rezultata za broj ciklusa je vidljivo da su sve epruvete pukle u prvom koraku, odnosno na prvom nivou opterećenja s izuzetkom epruveta NP 7 i P 7. Te epruvete su ujedno izdržale približno isti broj ciklusa. Najveća razlika je između epruveta NP 4 i P 4, kao i između epruveta NP 8 i P 8. Nepolirane epruvete s izuzetkom NP 4 izdržale su približno isti broj ili znatno veći broj ciklusa od poliranih epruveta. Isto tako nešto više pravilnosti u rezultatima je uočljivo kod poliranih nego kod nepoliranih epruveta.

Dobivene Wöhler-ove krivulje kao i gornji rezultati ukazuju na to da poliranje epruveta nije dalo očekivane rezultate. Za pretpostaviti je da se utori zbog malih dimenzija nisu mogli ravnomjerno ispolirati. Manji broj ciklusa do loma kod poliranih epruveta i grupiranim rezultatima za maksimalne pomake s relativno malim odstupanjima unutar pojedinih grupa ukazuje na sistematičnu pogrešku kod poliranja epruveta.

8. Literatura

- [1] M. Frantz: *Mehanička svojstva materijala*, FSB, Zagreb, 1988
- [2] B. Kraut: *Strojarski priručnik*, Axiom, Zagreb, 1977.
- [3] I. Alfirević: *Nauka o čvrstoći*, Tehnička knjiga d.d., Zagreb, 1995.
- [4] M. Husnjak: *Mehanika loma*, 2009.
- [5] Ouqi Zhang, Jason A. Poirier, James E. Barr: *Modified Locati Method in Fatigue Testing*, SAE International, Detroit, 2003.
- [6] S. Podrug: *Elementi strojeva*, Split, 2008.

9. Prilog

1. Programski kod za cikličko ispitivanje epruveta u deset koraka.