

UNIVERZITET U BEOGRADU  
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Vujadin D. Aleksić

**NISKOCIKLIČNI ZAMOR  
NISKOLEGIRANIH ČELIKA POVIŠENE  
ČVRSTOĆE**

doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Vujadin D. Aleksic

**LOW CYCLE FATIGUE OF HIGH  
STRENGTH LOW ALLOY STEELS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

**Mentor doktorske disertacije:**

dr Ljubica Milović, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-Metalurški fakultet

**Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:**

dr Marina Dojčinović, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-Metalurški fakultet

dr Nenad Radović, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-Metalurški fakultet

dr Zijah Burzić, naučni savetnik

Vojnotehnički institut Beograd

**Datum odbrane: 25.09.2019. god.**

*Mojoj Majci  
Ocu  
i Sestri*

# Predgovor

Doktorska disertacija „Niskociklični zamor niskolegiranih čelika povišene čvrstoće“ je jedan od rezultata višegodišnjih istraživanja (2014 – 2019) u okviru projekta br. TR 35011 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, pod nazivom „Integritet opreme pod pritiskom pri istovremenom delovanju zamarajućeg opterećenja i temperature“.

U laboratoriji za zavarivanje na Strojarskom fakultetu u Mariboru čiji je rukovodilac profesor Tomaž Vuherer, urađena je simulaciju zone uticaja toplote na pripremima od čelika NN-70, za potrebe udarnih i zamornih ispitivanja.

Eksperimentalna istraživanja niskocikličnog zamora čelika NN-70 urađena su u Vojnotehničkom institutu u Beogradu u Laboratoriji za konstrukcione i tehničke materijale pod rukovodstvom dr Zijaha Burzića naučnog savetnika, mr Srđe Perkovića dipl. inž. mašinstva i mr Ive Blačića dipl. inž. metalurgije.

Eksperimentalna istraživanja otpornosti čelika na uticaj kavitacije urađena su pod rukovodstvom profesorke Marine Dojčinović, na Tehnološko – metalurškom i Rudarsko – geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

U Institutu IMS kolege, tehničari Zoran Čiča i Dragan Karišić, sada pokojni, pomogli su kod IBR ispitivanja početnog uzorka, a kolegistica inženjer metalurgije Zorica Kovačević kod obrade i tumačenja rezultata ispitivanja metalurških uzoraka.

Profesor Nenad Radović, dao je značajne sugestije da ovaj rad dobije konačnu formu.

Zahvaljujem svim pojedincima i institucijama koji su bili otvoreni da mi pomognu u mome radu, a posebno veliku zahvalnost dugujem Institutu IMS, koji je i finansijski podržao izradu ove disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem mom mentoru, profesorki Ljubici Milović, koja me svojom stručnošću i dobronamernim savetima i primedbama vodila kroz moju disertaciju dajući značajan doprinos njenom kvalitetu.

Na kraju se zahvaljujem svojoj najbližoj porodici, supruzi Sanji i kćerkama Bojani, Ani i Jeleni, na iskrenoj i najvećoj podršci tokom svih godina izrade doktorske disertacije.

*Doktorat posvećujem majci Gospavi, pokojnom ocu Danilu i pokojnoj sestri Vujadinki.*

Beograd, septembar, 2019.

Autor:  
Vujadin D. Aleksić

# Sadržaj

<b>POGLAVLJE 1</b> .....	1
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>POGLAVLJE 2</b> .....	3
<b>2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA</b> .....	3
<b>2.1 Čelici visoke čvrstoće</b> .....	4
2.1.1. Niskolegirani čelici visoke čvrstoće.....	4
2.1.2. Karakteristike HSLA čelika.....	5
2.1.3. Uticaj hemijskog sastava i strukture na osobine HSLA čelika.....	6
2.1.4. Zavarljivost HSLA čelika.....	8
<b>2.2 Simulacija zone uticaja toplote</b> .....	11
2.2.1. Mehaničko-tehnološke osobine zavarenog spoja.....	11
2.2.2. Zona uticaja toplote.....	12
2.2.3. Termička simulacija zone uticaja toplote.....	17
<b>2.3. Uticaj zamora na ponašanje materijala</b> .....	19
2.3.1. Vrste zamora materijala.....	20
2.3.1.1. <i>Stvaranje zamorne prsline</i> .....	22
2.3.1.2. <i>Mehanizam stvaranja zamorne prsline</i> .....	24
2.3.2. Niskociklični zamor materijala.....	30
2.3.2.1. <i>Ispitivanje niskocikličnim zamorom</i> .....	30
2.3.2.2. <i>Ponašanje materijala pri niskocikličnom zamoru</i> .....	32
2.3.2.3. <i>Metode za određivanje stabilizovane histereze</i> .....	37
2.3.2.4. <i>Određivanje modula elastičnosti iz ciklusa <math>N_{1/4}</math></i> .....	40
2.3.3. Karakteristične krive niskocikličnog zamora.....	42
2.3.3.1. <i>Ciklična naponsko-deformaciona i kriva stabilizovanih histereza</i> .....	42
2.3.3.2. <i>Osnovna kriva i modifikovane krive niskocikličnog zamora</i> .....	45
2.3.3.2.1. <i>Morrow-ova kriva</i> .....	48
2.3.3.2.2. <i>Manson-Halford-ova kriva</i> .....	48
2.3.3.2.3. <i>Smith-Watson-Topper-ova kriva</i> .....	49
2.3.4. Predviđanje veka konstrukcija izloženih niskocikličnom zamoru.....	50

2.3.5. Analiza rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom.....	51
<b>2.4. Uticaj kavitacije na ponašanje materijala.....</b>	<b>60</b>
2.4.1. Ponašanje fluida pri prelasku iz tečnosti u gasovito stanje.....	60
2.4.1.1. <i>Kavitacioni mehur.....</i>	<i>62</i>
2.4.1.2. <i>Faze procesa kavitacije.....</i>	<i>64</i>
2.4.2. Vrste kavitacije.....	65
2.4.3. Mehanizmi kavitacije.....	66
2.4.4. Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije.....	67
2.4.5. Otpornost materijala na dejstvo kavitacije.....	71
2.4.5.1. <i>Ultrazvučna vibraciona metoda.....</i>	<i>72</i>
<b>POGLAVLJE 3.....</b>	<b>75</b>
<b>3. EKSPERIMENTALNI DEO.....</b>	<b>75</b>
<b>3.1. Materijal.....</b>	<b>75</b>
<b>3.2. Cilj eksperimenta.....</b>	<b>76</b>
<b>3.3. Priprema za glavna ispitivanje.....</b>	<b>76</b>
3.3.1. Algoritam ispitivanja čelika niskocikličnim zamorom.....	78
3.3.2. Algoritam ispitivanja otpornosti čelika na dejstvo kavitacije.....	80
3.3.3. Izrada modela uzorka i plana sečenja epruveta.....	82
<b>3.4. Simulacija zone uticaja toplote na uzorcima od čelika NN-70.....</b>	<b>84</b>
<b>3.5. Ispitivanje otpornosti čelika NN-70 na niskociklični zamor.....</b>	<b>85</b>
3.5.1 Postupak ispitivanja niskocikličnim zamorom.....	88
<b>3.6. Ispitivanje otpornosti čelika NN-70 na dejstvo kavitacije.....</b>	<b>90</b>
3.6.1. Postupak ispitivanja otpornosti materijala na dejstvo kavitacije.....	92
<b>POGLAVLJE 4.....</b>	<b>93</b>
<b>4. REZULTATI ISPITIVANJA.....</b>	<b>93</b>
<b>4.1. Rezultati pripremnih aktivnosti.....</b>	<b>93</b>
4.1.1. Vizuelno – dimenziona kontrola.....	93
4.1.2. Ispitivanja metodama bez razaranja.....	93
4.1.3. Merenje tvrdoće ploče.....	93
4.1.4. Ispitivanje hemijskog sastava.....	94

4.1.5. Ispitivanje zatezanjem.....	94
4.1.6. Ispitivanje udarom.....	95
4.1.6.1. Ispitivanje udarom u cilju izbora režima simulacije ZUT.....	95
4.1.6.2. Ispitivanje udarom u cilju određivanja PTK OM i SZUT.....	95
<b>4.2. Rezultati ispitivanja niskocikličnim zamorom.....</b>	<b>98</b>
4.2.1. Rezultati merenja epruveta posle ispitivanja NCZ.....	98
4.2.2. Mikrostrukture i prelomne površine epruveta posle ispitivanja NCZ.....	98
4.2.3. Određivanje modula elastičnosti.....	107
4.2.4. Određivanje područja stabilizacije i karakterističnih ciklusa.....	108
4.2.5. Određivanje podataka stabilizovanih histerezisnih krivih.....	109
4.2.6. Grupisanje podataka za proračun za odabrane cikluse stabilizacije.....	109
4.2.7. Konstruisanje CNDK i OKNCZ.....	109
4.2.8. Grupisanje podataka CNDK i OKNCZ za odabrane histereze.....	126
4.2.9. Određivanje prelaznog veka.....	130
<b>4.3. Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.....</b>	<b>131</b>
4.3.1. Otpornost materijala na dejstvo kavitacije – kavitaciona brzina.....	131
4.3.2. Morfologija oštećenja uzorka OM izloženog dejstvu kavitacije.....	131
4.3.3. Morfologija oštećenja uzorka SZUT izloženog dejstvu kavitacije.....	135
 <b>POGLAVLJE 5.....</b>	<b>139</b>
<b>5. ANALIZE I DISKUSIJA.....</b>	<b>139</b>
<b>5.1. Analiza rezultata pripremnih ispitivanja.....</b>	<b>139</b>
5.1.1. Analiza rezultata udarnih ispitivanja.....	140
5.1.1.1 Analiza rezultata u cilju izbora režima simulacije ZUT.....	141
5.1.1.2 Analiza rezultata određivanja PTK OM i SZUT.....	141
<b>5.2. Analiza rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom.....</b>	<b>142</b>
5.2.1. Analiza dimenzija epruveta posle loma usled NCZ OM i SZUT.....	143
5.2.2. Analiza mikrostrukture i prelomnih površina posle NCZ OM i SZUT.....	143
5.2.2.1 Analiza prelomne površine uzorka, OM, $\Delta\varepsilon/2 = 0,4\%$ .....	143
5.2.2.2 Analiza prelomne površine uzorka, OM, $\Delta\varepsilon/2 = 0,8\%$ .....	144
5.2.2.3 Analiza prelomne površine uzorka, SZUT, $\Delta\varepsilon/2 = 0,4\%$ .....	144
5.2.2.4 Analiza prelomne površine uzorka, SZUT, $\Delta\varepsilon/2 = 0,7\%$ .....	145



5.2.3. Analiza rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom OM i SZUT.....	145
<b>5.3. Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.....</b>	<b>148</b>
5.3.1. Otpornost na dejstvo kavitacije uzorka OM.....	148
5.3.2. Otpornost na dejstvo kavitaciju uzorka SZUT.....	149
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>150</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>152</b>
<b>BIOGRAFIJA I IZJAVE.....</b>	<b>164</b>
<b>PRILOZI (na CD-u)</b>	
Prilog 1: VDK uzorka – ploče za izradu epruveta za ispitivanje.....	1
Prilog 2: Ispitivanje ploče 1 metodom magnetnih čestica.....	2
Prilog 3: Ispitivanje homogenosti ploče 1 ultrazvukom.....	3
Prilog 4: Merenje tvrdoće na površinama ploče 1.....	4
Prilog 5: Hemijski sastav čelika NN-70, u %, iz različitih izvora.....	6
Prilog 6: Zatezne karakteristike čelika NN-70, iz različitih izvora.....	7
Prilog 7: Dijagrami ispitivanja čelika NN-70, zatezanjem.....	8
Prilog 8: Režimi simulacije ZUT čelika NN-70.....	9
Prilog 9: Rezultati ispitivanja SZUT NN-70 za različite režime.....	10
Prilog 10: Izbor $\Delta t_{8/5}$ za uzorke SZUT za određivanje PTK i ispitivanja LCF i ONK....	14
Prilog 11: Rezultati ispitivanja udarom, čelik NN-70, OM i SZUT.....	15
Prilog 12: Određivanje PTK, čelik NN-70, OM i SZUT.....	28
Prilog 13: Rezultati merenje epruveta posle ispitivanja NCZ.....	32
Prilog 14: Vrednosti modula elastičnosti, E, OM čelika NN-70.....	34
Prilog 15: Vrednosti modula elastičnosti, E, SZUT čelika NN-70.....	37
Prilog 16: Dijagrami ekstremnih vrednosti sila opterećenja i broja ciklusa za svaki amplitudni nivo deformacije, OM i SZUT čelika NN-70.....	40
Prilog 17: Stabilizovani ciklusi LCF, OM i SZUT čelika NN-70.....	43
Prilog 18: Karakteristični podaci stabilizovanih histereza, OM i SZUT NN-70.....	54
Prilog 19: Rezultati za konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM i SZUT čelika NN-70.....	74
Prilog 20: Dodatne analize posle ispitivanja NCZ.....	90

Prilog 21: Razaranje čelika NN-70 pod dejstvom kavitacije.....	98
Prilog 22: Predlog alata za buduća ispitivanja NCZ.....	111

# **Niskociklični zamor niskolegiranih čelika povišene čvrstoće**

## **REZIME**

Imajući u vidu heterogenost svojstava zavarenog spoja, a naročito uske zone pod uticajem toplote, u ovoj disertaciji je eksperimentalno ispitivano i analizirano ponašanje niskolegiranih čelika povišene čvrstoće (HSLA) u uslovima niskocikličnog zamora, na glatkim okruglim epruvtama iz osnovnog metala i epruvtama dobijenim termičkom simulacijom zone pod uticajem toplote. Takođe je ispitivano ponašanje osnovnog metala i simulirane zone pod uticajem toplote u uslovima dejstva kavitacije.

Čelik, Nionikral 70 (NN-70), odabran u ovoj disertaciji za istraživanje ponašanja pri zamornom opterećenju i dejstvu kavitacije, spada u grupu niskolegiranih čelika povišene čvrstoće koji se, između ostalog, primenjuju u brodogradnji kao i za izradu posuda pod pritiskom.

Ciljevi istraživanja su da se, u odsustvu pouzdanijih teorija o zamaranju i kavitaciji, pogodnom metodom ispitivanja, tj. simuliranjem strukture materijala i dejstva opterećenja odnosno deformacija, u laboratorijskim uslovima na odgovarajućim uzorcima - epruvtama, dođe do rezultata koji su posredno ili neposredno primenljivi u proračunima i da se dobijeni rezultati eventualno iskoriste i za fundamentalna proučavanja tokova procesa zamaranja i kavitacije kako osnovnog metala, tako i zone uticaja toplote zavarenih spojeva.

**Ključne reči:** niskolegirani čelici povišene čvrstoće, simulirana zona uticaja toplote, niskociklični zamor, stabilizovana histereza, zamorna prslina, kavitacija

**Naučna oblast:** Metalurgija

**UDK broj:**

# **Low cycle fatigue of high strength low alloy steels**

## **ABSTRACT**

In this dissertation the experimentally investigated and analyzed behavior of a low-alloyed high strength steel exposed to the low cycle fatigue is done. Taking into account the welded joint properties heterogeneity, especially its narrow heat-affected zone, experiments were performed on two kinds of specimens: smooth round specimens made of parent material (PM) and specimens obtained by thermal simulation of the heat-affected zone (SHAZ). The behavior of PM and SHAZ affected by cavitation were also investigated.

Steel designated as Nionical 70 (NN-70), selected in this dissertation to investigate the behavior of fatigue and cavitations' loads, belongs to a group of low-alloy steels of high strength, which are, among other things, applied in shipbuilding as well as for the production of pressure vessels.

The research aims are that, in the absence of more reliable theories of fatigue and cavitation, a suitable test method, i.e. simulating the structure of the material and the load and/or deformation in laboratory conditions on the appropriate specimens, results are obtained which are directly or indirectly applicable in the calculations, and that the obtained results are possibly used for the fundamental study of the fatigue and cavitation processes of the parent material, as well as its heat-affected zone in welded joints.

**Key words:** HSLA steels, simulated heat-affected zone, low cycle fatigue, stabilized hysteresis loop, fatigue crack, cavitation

**Scientific discipline:** Metallurgy

**UDC number:**

## Spisak korišćenih oznaka u radu

$2N_f$	broj promena pravca opterećenja do otkaza, the number of reversals to failure
$a$	dužina prsline, mm
A/D	analogno/digitalni konvertor
$A_5$	izduženje epruvete, %
$A_c$	Oznake kritičnih tačaka pri zagrevanju (A od fr. arrat-zastoj i c od fr. choffage-zagrevanje)
$A_r$	Oznake kritičnih tačaka pri hlađenju (A od fr. arrat-zastoj i r od fr. roidissement-hlađenje)
$b$	eksponent zamorne čvrstoće, Basquin-ov eksponent
BNP	bruto nacionalni proizvod
$c$	eksponent zamorne duktilnosti, Manson-Coffin-ov eksponent
CCT diagram	Dijagram transformacije kontinuiranog hlađenja (Continuous Cooling Transformation diagram)
CD	Kompakt disk za čuvanje podataka – compact disc
CGHAZ	grubozrni ZUT (Grain coarsened HAZ), coarse-grained heat affected zone
$\Delta\varepsilon$	raspon deformacije ili ukupna deformacija
$\Delta\varepsilon/2$	amplituda ukupne deformacije
$\Delta\varepsilon/2 \cdot E$	stvarni idealno elastični napon
$\Delta\varepsilon_e$	ukupna elastična deformacija
$\Delta\varepsilon_p$	ukupna plastična deformacija
DM	ododatni materijal
$\Delta\sigma$	raspon napona
$\Delta\sigma/2$	amplituda napona pri čistom naizmenično promenljivom opterećenju
$E$	modul elastičnosti, Youngov modul
$E_0$	modul elastičnosti, linearizovan
$E_1$	modul elastičnosti, linearizovan sa koordinatnim početkom u 0,0
$\varepsilon_f$	prava deformacija loma, $\varepsilon_f = \ln(A_0/A_f)$
$\varepsilon'_f$	koeficijent zamorne duktilnosti
$\varepsilon_{f,el} = \sigma_f/E$	prava elastična deformacija loma kod duktilnih materijala
$E_i$	energija iniciranja (stvaranja) prsline
$\varepsilon_{max}$	maksimalna deformacija
$\varepsilon_{min}$	minimalna deformacija
$E_p$	energija propagacije (širenja) prsline, J
$E_{sr}$	srednja vrednost modula elastičnosti $(E_0 + E_1)/2$
$E_t$	ukupna energija
EXCEL	kompjuterski program
$F$	sila, kN

f	frekvencija
$F_{\max}$	maksimalna vrednost sile opterećenja koja pripada gornjoj tački histereze naponsko-deformacionog odziva
$F_{\min}$	minimalna vrednost sile opterećenja koja pripada donjoj tački histereze naponsko-deformacionog odziva
HSLA	niskolegirani čelik visoke čvrstoće (High Strength Low Alloyed steel)
IBR	ispitivanja metodama bez razaranja
IMS	Institut za ispitivanje materijala Srbije u Beogradu
JL	jamičasti lom
$K'$	koeficijent ciklične čvrstoće
$K_i$	nivo početne žilavosti
$K_{Ic}$	kritična vrednost faktora intenziteta napona, MPa m <sup>1/2</sup>
KoBSON	Konzorcijuma biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku
KOM	kavitacija osnovnog metala
KSZUT	kavitacija simulirane zone uticaja toplote
$K_\epsilon$	faktor koncentracije deformacije
$K_\sigma$	faktor koncentracije napona
$L_0$	original gauge length
LCF	Low Cycle Fatigue, Niskociklični zamor
$L_o$	merna dužina epruvete, mm
m	koeficijent pravca linearnog dela krive
MNL	mesto nastanka loma
MO	mehaničko oštećenje
MOM	metalografija osnovnog materijala
MSZUT	metalografija simulirane zone uticaja toplote
MŠ	metal šava
MT	ispitivanje materijala magnetnim česticama
MTS	Material Testing System
$N$	broj ciklusa opterećenja do konačnog loma
$N$	broj ciklusa pri ispitivanju zamorom
$n'$	eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja
$N_{1/4}$	prva četvrtina zamornog ciklusa
$N_{-100\%}$	ciklus pada sile do $F=0$
$N_{-25\%}$	ciklus pada sile od 25 % (ISO 12106:2003(E))
$N_{-50\%}$	ciklus pada sile od 50 % (ASTM E 606-04)
NCZ	nisko ciklični zamor (LCF – Low cycle fatigue)
NDT	Non Destructive Testing (ispitivanja bez razaranja)
NDTT	Nil-Ductility Transition Temperature
$N_{\text{end}}$	ciklus završetka ispitivanja
$N_f$	broj ciklusa do iniciranja prsline
$N_{fT}$	ciklus preseka krivih elastične i plastične komponente, prelazni vek

$N_i$	broj ciklusa potreban za stvaranje, inicijaciju, zamorne prsline
$N_{ks}$	ciklus kraja stabilizacije
NN-70	Nionikral 70, trgovački naziv HSLA čelika proizvođača Železare Jesenice, (niskolegirani čelik povišene čvrstoće)
$N_p$	broja ciklusa potreban za rast, propagaciju, prsline
$N_{pNDT}$	ciklus praga NDT
$N_{procena}$	grubo određen ciklus u kome dolazi do značajnog pada sile, procena operatera za pad sile
$N_{ps}$	ciklus početka stabilizacije
$N_s$	broj ciklusa stabilizovane histereze
$N_{start}$	ciklus početka ispitivanja, $F=\max$
$N_{xx\%}$	ciklus pada sile za xx %;
OM	osnovni metal (materijal)
ONK	otpornost na kavitaciju
p	poprečno na pravac valjanja
pIBR	prag IBR
$p_k$	kritična vrednost pritiska isparavanja tečnosti na datoj temperaturi
PMA	površina metalografske analize
PPL	plastični prelazni lom (FTP – fracture transition plastic)
$P_{SWT}$	Smith-Watson-Topper-ov parametar
PT	ispitivanje materijala penetrantima
PTK	prelazna temperatura krtosti
PWHT	termička obrada posle zavarivanja (Post Weld Heat Treatment)
$R_\epsilon$	faktorom asimetrije
RG	radijalni grebeni
$R_m$	zatezna čvrstoća, MPa, tensile strength
$R_{p0,2}$	napon tečenja pri izduženju od 0.2%, granica plastičnosti, čvrstoća popuštanja, MPa
RZS	realni zavareni spoj
RZUT	realna zona uticaja toplote
$R_\epsilon$	faktor asimetrije ciklusa
$\sigma-\epsilon$	opisuje pravu monotonu naponsko – deformacionu krivu, a
S-e	inženjersku monotonu naponsko –deformacionu krivu, ( $S = F/A_0$ )
$\sigma_{eH}$	gornja granica napona tečenja
SEM	Scanning Electron Microscopy
$\sigma'_f$	koeficijent zamorne čvrstoće
SL	statički lom
$\sigma_M$	zatezna čvrstoća
SZUT	simulirana zona uticaja toplote

ŠZP	širenje zamorne prsline
$T$	period, s
$t$	vreme, s
$T_0$	preheat and inter-pass temperature
$T_1$	prelazna temperatura ( $T_1$ do $T_5$ – prelazna temperatura zavisna od primenjenog kriterijuma)
$T_K$	kritična temperatura isparavanja tečnosti
TMCP	(Thermo-Mechanical Control Processing), termomehanička kontrolisana prerada ili samo termomehanička prerada
TNP	temperatura nulte plastičnosti (NDT - nil-ductility transition temperature)
tzp	tehnička zamorna prsline
u	uzdužno na pravac valjanja
$U_\varepsilon$	u voltima izražen električni signal za deformaciju $\varepsilon$
$U_F$	u voltima izražen električni signal za silu $F$
UT	ispitivanje materijala ultrazvukom
VCZ	visoko ciklični zamor
VDK	vizuelno dimenziona kontrola
VL	vlaknast lom
$v_{opt}$	brzina opterećenja
VTI	Vojno tehničkog institut, Žarkovo, Srbija
Y	proba zavarivanja
Z	suženje poprečnog preseka nakon loma, %
ZB	zamorne brazde
ZM	zamor materijala
ZS	zavareni spoj (
ZUT, HAZ	zona uticaja toplote (HAZ – heat affected zone)
$\alpha$	bezdimeziona konstanta
$\alpha$ -phase	Ferrite, alpha-ferrite
$\gamma$ -phase	Austenite, austenite
$\delta$	delta ferrite
$\Delta l$	apsolutno izduženje/suženje merne dužine, mm
$\Delta t_{8/5}$	vreme hlađenja između 800 i 500 °C, Cooling time between 800 and 500 °C
$\Delta \varepsilon$	raspon ukupne deformacije, %
$\Delta \varepsilon/2$	amplituda deformacije, %
$\Delta \varepsilon_e$	raspon elastične deformacije, %
$\Delta \varepsilon_e/2$	amplituda elastične deformacije, %
$\Delta \varepsilon_p$	raspon plastične deformacije, %
$\Delta \varepsilon_p/2$	amplituda plastične deformacije, %
$\Delta \sigma$	raspon ukupnog napona, MPa



$\Delta\sigma/2, \sigma_a$	amplituda (poluraspon) napona, MPa
$\varepsilon$	deformacija, %
$\varepsilon$	relativno izduženje
$\varepsilon_e$	elastična deformacija, %
$\varepsilon_f'$	koeficijent zamorne duktilnosti
$\varepsilon_f$	creep strain
$\dot{\varepsilon}_f$	creep strain rate
$\dot{\varepsilon}_{f(\min)}$	minimum creep strain rate
$\varepsilon_p$	plastična deformacija, %
$\nu$	Poasonov koeficijent
$\sigma$	normalni napon, MPa, stress
$\sigma_f'$	koeficijent zamorne čvrstoće
$\sigma_M$	zatezna čvrstoća
$\sigma_T$	granica tečenja

# Poglavlje 1

## 1. UVOD

Teorijska, eksperimentalna i numerička istraživanja problematike ponašanja niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u uslovima opterećenja niskocikličnim zamorom, i u uslovima dejstva kavitacije, a koja su opisana u ovom radu, predstavljaju veoma složen istraživački zadatak.

Obimna teorijska istraživanja su zahtevala sintezu znanja iz više inženjerskih oblasti i disciplina, a numerička i eksperimentalna istraživanja koja predstavljaju veoma značajan deo ovog rada, su zaslužna za naučni doprinos ove disertacije.

Detaljnou analizom istorijskog pregleda istraživanja u ovoj oblasti, kao i analizom najnovijih publikovanih rezultata, napravljena je osnova za dalja istraživanja u oblasti zamora i uticaja dejstva kavitacije na ponašanje materijala.

Čelik, Nionikral 70 (NN-70), odabran u ovoj disertaciji za istraživanje ponašanja pri delovanju zamarajućeg i kavitacionog opterećenja, spada u grupu niskolegiranih čelika povišene čvrstoće, pogodnih za zavarivanje, između ostalog se primenjuju u brodogradnji kao i za izradu posuda pod pritiskom.

Imajući u vidu heterogenost svojstava zavarenog spoja, a naročito uske zone pod uticajem toplote (ZUT), u ovoj disertaciji je eksperimentalno ispitivano i analizirano ponašanje niskolegiranog čelika povišene čvrstoće (HSLA) u uslovima niskocikličnog zamora, na glatkim okruglim epruvtama iz osnovnog metala (OM) i epruvtama dobijenim termičkom simulacijom zone pod uticajem toplote (SZUT), odnosno njihova sklonost ka inicijaciji prsline u OM i SZUT, kao najkritičnijem delu ZS. Takođe je ispitano ponašanje osnovnog metala i simulirane zone pod uticajem toplote u uslovima dejstva kavitacije.

Cilj istraživanja je bio da se u odsustvu pouzdanijih teorija o zamaranju i kavitaciji, pogodnim metodama ispitivanja, tj. simuliranjem strukture materijala i toka opterećenja odnosno deformacija u laboratorijskim uslovima na odgovarajućim uzorcima - epruvtama, dođe do rezultata koji su posredno ili neposredno primenljivi u proračunima i da se dobijeni rezultati, eventualno, iskoriste i za fundamentalna

proučavanja tokova procesa zamaranja i otpornosti na dejstvo kavitacije (ONK) kako osnovnog metala, tako i zone uticaja toplote kod zavarenih spojeva.

Jedan od ciljeva istraživanja nametnuo se tokom obrade rezultata eksperimentalnih ispitivanja, a izražen je kroz poboljšavanje metodologije i metoda za obradu rezultata ispitivanja radi uspostavljanja univerzalne metodologije za procenu ponašanja materijala.

Posvećena je pažnja istraživanju i analizi postojećih rezultata koji su kao određene smernice korišćeni i u ovom radu, a vezani su za ponašanje OM i ZS čelika NN-70, koji je korišćen u ovom radu kao materijal za izvođenje glavnog eksperimenta, odnosno ispitivanja NCZ. Da bi utvrdili da li ova klasa čelika može da se primeni za izradu zavarenih elemenata i sistema hidrauličnih mašina izloženih dejstvu kavitacije tokom radnog veka ispitana je sklonost OM i njegove simulirane zone pod uticajem toplote kavitacionom oštećenju, odnosno ispitana je otpornosti na dejstvo kavitacije.

Analizom postojećih rezultata ukazala se potreba za daljim istraživanjima i uspostavljanjem novih univerzalnih principa u pogledu tačnosti određivanja i izračunavanja parametara, korišćenjem raznih kompjuterskih aplikacija, koji direktno ili indirektno opisuju ponašanje materijala.

U radu je prikazana nova metodologija za preciznije određivanje područja stabilizacije, sa prikazom nove metode, praga IBR, za određivanje stabilizovane histereze, koja povezuje mogućnost praktičnog određivanja prslina metodama IBR i opisa ponašanja materijala opterećenog niskocikličnim zamorom.

Nova metodologija za određivanje područja stabilizovanih histereza i mogućnost izbora stabilizovane histereze za zadati kriterijum, kao i metoda praga IBR za određivanje stabilizovane histereze otvaraju nove poglede za buduća istraživanja. Ovo se odnosi na primenu kod ispitivanja niskocikličnim zamorom drugih materijala sa zadatim kriterijumom određivanja stabilizovane histereze u različitim radnim uslovima.

Kao jedan od veoma zanimljivih i perspektivnih pravaca budućih istraživanja nameće se primena razvijene metodologije u cilju definisanja veličine zamorne prslina, kao glavnog parametra karakterizacije postojanja zamora, u uslovima promenljivog opterećenja radi što kvalitetnijeg određivanja zamornog veka i procene otpornosti materijala ka stvaranju prslina, čiji se razvoj može pratiti metodama IBR do njene kritične veličine.

## Poglavlje 2

### 2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Najznačajniju ulogu pri lomu materijala mašinskih delova i konstrukcija ima zamor [1]. Veliki broj oštećenja konstrukcija, izazvanih zamorom materijala (ZM), dovodi do katastrofalnih lomova. Procenjeno je da takva oštećenja predstavljaju 50 do 90 % svih oštećenja u eksploataciji [2, 3]. Zbog toga su proučavanju lomova izazvanih zamornim opterećenjem i uslova u kojima dolazi do pojave i rasta prslina, već više od 160 godina, posvećena obimna istraživanja [4, 5, 6, 7, 8].

I pored toga što se u svetu svakog dana objavi više od 10 publikacija vezanih za zamor materijala [3, 4], ekonomski uticaj lomova mašinskih delova i konstrukcija u svetu je značajan i iznosi približno 4% bruto nacionalnog proizvoda (BNP) [1, 3]. Poznati su brojni primeri katastrofalnih havarija, a među najteže se ubrajaju havarije platformi za eksploataciju nafte [9].

Brzi napredak u oblasti zamora materijala može se pratiti pomoću raznih baza podataka koje mogu da sadrže i više miliona zapisa [3], a kod nas je to omogućeno preko baze podataka Konzorcijuma biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku (KoBSON) [10, 11].

Rendgenografskom analizom mikrostrukture u zoni dinamičkog loma utvrđeno je prisustvo vrlo malih mikroplastičnih deformacija i u slučajevima zamaranja za koje se do tada smatralo da se odvija isključivo u oblasti elastičnosti. Iako je mašinski deo kao celina napregnut elastično, napon i deformacije na mestima koncentracije napona i deformacija mogu da budu i u oblasti plastičnosti, što je glavni razlog da po pravilu dolazi do pojave zamorne prsline na ovim mestima. [12]

Tokovi razaranja pri niskocikličnom zamoru su u dovoljnoj meri detaljno i sveobuhvatno eksperimentalno istraživani, ali se pri tom kao i kod visokocikličnog zamora još uvek nije utvrdila neka opšta zavisnost tokova zamaranja. Uz neke uglavnom empirijske dopune, takođe se i u ovoj oblasti zamora koriste neke ranije nastale hipoteze o visokocikličnom zamoru sa svim svojim nedostacima čija verifikacija

zahteva detaljnu eksperimentalnu proveru ispitivanjem epruveta, modela i prototipova konstrukcija. [12]

## 2.1. Čelici visoke čvrstoće

Razvoj savremenih metalnih konstrukcija postavlja pred metalurge i konstruktore problem osvajanja čelika visoke čvrstoće. Prednosti čelika visoke čvrstoće u odnosu na ostale konstrukcijske čelike su: smanjena masa konstrukcije, povećana nosivost, povećan vek trajanja konstrukcije i manji troškovi izrade [13].

Projektovanje potpuno novih materijala imaće ekonomsku opravdanost samo u slučaju da je praćeno istovremenim usavršavanjima u primarnoj i sekundarnoj preradi i projektovanju, kao i mogućnosti recikliranja [14, 15].

Razvoj novih materijala za napredne tehnologije i namene, koji mora ispuniti i zahteve veoma visokih standarda postavljenih ekološkim zakonodavstvom, i opšteg trenda očuvanja resursa i energije, od velikog je značaja za dalji razvoj svetske privrede.

Modeliranje svih faza prerade i fabrikacije čelika postaje sve efikasniji metod za poboljšanje struktura i mehaničkih osobina, kao i ušteda energije, što se može ilustrovati na modeliranju toplog valjanja (TMCP) [16, 17, 18]. Po pravilu, modeliranju prethodi fizička simulacija TMCP u laboratorijskim uslovima, koja je pogodna za izučavanje kako TMCP novih čelika, tako i TMCP komercijalnih čelika, a u cilju unapređenja njihove proizvodnje i/ili optimizacije uslova prerade na novim postrojenjima. Modeliranje procesa plastične deformacije na povišenim temperaturama podrazumeva razvoj integralnog modela koji obuhvata tri podmodela: podmodela koji opisuje raspodelu temperature trake; podmodela koji predskazuje otpor metala deformaciji i podmodela koji opisuje promene u mikrostrukturi [19].

### 2.1.1. Niskolegirani čelici visoke čvrstoće

Niskolegirani čelici visoke čvrstoće (HSLA) (arktički čelik [20]) razvijeni su tokom 60-ih i 70-ih godina kako bi se odgovorilo problemima vezanim za zavarivanje konvencionalnih građevinskih čelika i nesrećama s krtim lomovima izazvanim niskim temperaturama. [21]

Niskolegirani čelici visoke čvrstoće (HSLA) su čelici legirani sa jednim ili više elemenata pri čemu zbirni sadržaj svih legirajućih elemenata ne prelazi 5%, a mogu se podeliti prema nivou postignute čvrstoće, odnosno granice tečenja na:

1. Niskolegirane čelike nazvane **čelici povišene čvrstoće**, kod kojih se posle valjanja i normalizacije dostiže granica tečenja do 560 MPa.
2. Niskolegirane čelike kod kojih se posle kaljenja i otpuštanja dostiže granica tečenja do 1200 Mpa, koje zovemo **čelici visoke čvrstoće**. Ovu grupu čelika po pravilu čine poboljšani čelici.
3. Niskolegirane čelike kod kojih se posle kaljenja i otpuštanja postiže granica tečenja iznad 1200 Mpa, a zovemo ih **čelici vrlo visoke čvrstoće**.

### 2.1.2. Karakteristike HSLA čelika

Zbog svojih prednosti niskolegirani čelici visoke čvrstoće masovno se koriste kod izrade konstrukcija kao što su: posude pod pritiskom, brodogradnja, transportna sredstva, nuklearna postrojenja, noseće čelične konstrukcije.

Kod ovih konstrukcija najčešće primenjavani postupak oblikovanja je spajanje zavarivanjem. Niskolegirani čelici visoke čvrstoće, namenjeni za izgradnju zavarenih konstrukcija pored visoke čvrstoće, treba da imaju dobru plastičnost, dovoljnu udarnu žilavost, visoku otpornost prema krtom limu, zadovoljavajuću obradljivost, dobru zavarljivost i da su proizvedeni ekonomičnim postupkom.

U cilju zadovoljavanja svih ovih uslova, koriste se različiti sistemi legiranja, tehnološki i metalurški faktori čijom se kombinacijom dobijaju neophodne osobine.

Visoke mehaničke osobine niskolegiranih čelika se postižu ojačavanjem. Ojačavanje metala nastaje kao posledica težnje da se spreči kretanje dislokacija [22, 23]. Smanjenje pokretljivosti dislokacija može biti uslovljeno raznim uzrocima i u vezi sa tim razlikuju se više mehanizama ojačavanja. Za niskolegirane čelike visoke čvrstoće najkarakterističniji su sledeći mehanizmi ojačavanja [23, 24]: ojačavanje stvaranjem čvrstog rastvora, disperziono ojačavanje čelika, ojačavanje granicama zrna, i ojačavanje alotropskim preobražajima.

Dobra kombinacija osobina kod niskolegiranih čelika visoke čvrstoće, obično se postiže istovremenim delovanjem više mehanizama ojačavanja.

Niskolegirani čelici visoke čvrstoće zbog svoje cene i nivoa proizvodne tehnologije imaju nizak sadržaj S, P i drugih primesa, a odlikuju se i povećanom čistoćom u odnosu na gasove i nemetalne uključke.

Ovi čelici posle odgovarajuće termičke obrade, po nivou plastičnosti i žilavosti, u velikom broju slučajeva prevazilaze vrednosti plastičnosti kod nisko ugljeničnih čelika [13].

Zbog povoljnih kombinacija osobina, niskolegirani čelici visoke čvrstoće se masovno koriste za zavarivanje. Kada je reč o legiranju i termomehaničkoj obradi ovih čelika mora se ukazati da nisu svi niskolegirani čelici podjednako pogodni za zavarivanje. Što je čelik više legiran, uključujući i ugljenik, elementima koji obrazuju krte strukture pri zavarivanju, to je lošija zavarljivost. Za niskolegirane čelike visoke čvrstoće karakteristična je osobina obrazovanja zakaljive strukture u zoni uticaja toplote (ZUT), što povećava sklonost ka pojavi krtog loma [13], pa pri izboru čelika, od kojeg se očekuje izrada sigurne konstrukcije, pored pokazatelja čvrstoće osnovnog metala, potrebno uzeti u obzir i druge mehaničko tehnološke osobine kako osnovnog metala tako i zavarenog spoja.

### 2.1.3. Uticaj hemijskog sastava i strukture na osobine HSLA čelika

Osobine čelika su određene hemijskim sastavom, načinom izrade, termomehaničkim tretmanom i strukturnim sastavom.

Odlučujući uticaj na osobine legiranih čelika, pa i niskolegiranih čelika visoke čvrstoće, ima hemijski sastav, s obzirom da se može reći da ostali uticajni faktori na osobine čelika su u neposrednoj vezi ili su posledica hemijskog sastava [13].

U zavisnosti od vrste čelika, uticaj legirajućih elemenata se određuje njihovim dejstvom na ojačanje ferita, količinu i disperznost karbidne faze, prokaljivost i druge faktore.

Osnovni legirajući elementi koji se dodaju niskolegiranim čelicima visoke čvrstoće su: **hrom, mangan, silicijum, nikel, molibden i vanadijum**. Uticaj ovih legirajućih elemenata na osobine čelika nije jednak, čak nije ni linearan. Na primer, uticaj koncentracije elemenata na tvrdoću čelika je sledeći: uvođenje 1% Mn izaziva povećanje tvrdoće čelika za 96 jedinica po Vickers-u, 1% Ni za 23, 1% Cr za 136, 1%

Mo za 64, 1% V za 90, 1% W za 60 dok 0,1% ugljenika povećava tvrdoću za 43 jedinice [23].

**Ugljenik** je veoma pogodan elemenat za ojačavanje. Povećanje sadržaja ugljenika kod čelika intenzivno utiče na porast zatezne čvrstoće i granice tečenja. Sa druge strane je poznato da sa porastom sadržaja ugljenika u čeliku dolazi do pada udarne žilavosti i smanjenja plastičnosti [24, 26]. Sa stanovišta zavarljivosti ugljenik deluje vrlo nepovoljno, s obzirom da povećava zakaljivost u zoni pod uticajem toplote, a time povećava verovatnoću pojave hladnih prslina. Takođe, ugljenik negativno utiče i sa stanovišta pojave toplih prslina i prslina usled žarenja [26]. Kod feritno-perlitnih čelika povećani sadržaj ugljenika se negativno odražava i na sigurnost konstrukcija, s obzirom da više utiče na zateznu čvrstoću nego na granicu tečenja tako što smanjuje odnos  $\sigma_T/\sigma_M$ .

**Silicijum** povećava zakaljivost, zateznu čvrstoću i tvrdoću a pogoršava udarne osobine metala šava naročito pri niskim temperaturama. Povećanje silicijuma smanjuje i otpornost prema prslinama. Sa druge strane on je koristan kao dodatak za dezoksidaciju. Iako se svi autori slažu da silicijum pogoršava osobine žilavosti, postoji neslaganje oko nivoa pri kome ova pojava postaje izražena. Razlog za to je činjenica da se silicijum različito ponaša u raznim sistemima legiranja čelika. Kod niskolegiranih čelika visoke čvrstoće preporučena je maksimalni sadržaj silicijuma od 0,6%. Pokazalo se da se pri tom sadržaju silicijuma postižu pozitivni efekti sa stanovišta čvrstoće i dezoksidacije pri čemu ne dolazi do oštrog pada udarnih osobina i žilavosti loma. Sa druge strane, efekat povećanja čvrstoće čelika legiranih sa silicijumom omogućava smanjenje sadržaja ugljenika, čime se poboljšava zavarljivost i otpornost prema krtom lomu.

**Mangan** povećava granicu razvlačenja, neznatno utiče na plastičnost i snižava udarnu žilavost. Mangan, takođe povećava i zakaljivost čelika. Zbog smanjenja plastičnosti i žilavosti sadržaj mangana se ograničava (do oko 1,8-2 %) izuzev u slučajevima kada presudnu važnost imaju povišena tvrdoća čelika i otpornost prema habanju. Pored toga mangan je dezoksidirajući element bitan za postizanje potrebne čistoće čelika.

**Hrom**, kao element koji je sklon obrazovanju karbida, povećava tvrdoću i zakaljivost čelika. Do sadržaja od 0,9 % povoljno deluje na mehaničke osobine, posebno kod kompleksno legiranih čelika, jer usitnjava strukturu, međutim sa daljim



povećanjem sadržaja hroma, granica razvlačenja, čvrstoća i tvrdoća i dalje rastu, ali se javlja negativan uticaj na plastičnost i žilavost [26]. Međutim, kod čelika od kojih se pre svega traži visoka čvrstoća obično se legiranje hromom obavlja i preko 1 % da bi se dobila veća čvrstoća bez obzira na smanjenje osobine plastičnosti.

**Nikl** pokazuje pozitivan uticaj na plastičnost i udarnu žilavost, a povećava i otpornost čelika prema krtom lomu [27]. Prokaljivost čelika se primetno povećava sadržajem nikla. Kod konstrukcijskih čelika, povećanje sadržaja nikla od 1,5 – 3 % skoro i ne utiče na porast tvrdoće u kaljenom stanju, ali doprinos legiranja ovim količinama nikla se ogleda u porastu žilavosti, ostalih plastičnih karakteristika i pomeranju praga krtosti ka niskim temperaturama.

**Molibden** povećava zakaljivost, zateznu čvrstoću i granicu razvlačenja. Legiranje molibdenom od 0,2 - 0,3 % sprečen je porast zrna i smanjena je osetljivost na pregrevanje prilikom zagrevanja čelika bilo za termičku obradu ili plastičnu preradu. Mada o delovanju molibdena na promenu žilavosti postoje različita mišljenja generalno se uzima da molibden dovodi do povećanja čvrstoće, pada žilavosti, odnosno smanjuje otpornost prema razvoju loma i povećava kritičnu temperaturu krtosti [26]. I pored navedenih negativnosti, molibden je čest legirajući element zbog potrebe za povećanjem čvrstoće i sprečavanja pojave otpusne krtosti pri termičkoj obradi.

**Vanadijum** se dodaje u malim količinama u cilju povećanja granice razvlačenja i čvrstoće. Pri tome se nivo žilavosti bitno ne menja. Ovo se postiže time što vanadijum intenzivira precipitacijsko očvršćavanje.

Pojedini metalurško-strukturni parametri utiču na pomeranje kritične tačke prelazne temperature [28, 29, 30], odnosno na njihov uticaj na pojavu krtog loma. Najčešće ispitivani parametar niskolegiranih čelika je uticaj osnovnih legirajućih i pratećih hemijskih elemenata na položaj prelazne temperature [31]. Feritni i feritno perlitni čelici skloniji su krtom lomu nego austenitni.

#### 2.1.4. Zavarljivost HSLA čelika

Jedna od bitnih karakteristika metalnog materijala je njegova sposobnost za oblikovanje zavarivanjem. Spajanje zavarivanjem je vrlo čest postupak oblikovanja metalnih materijala koji ima niz prednosti u odnosu na druge postupke spajanja metala

ili izrade konstrukcija. Sve veća primena čelika visoke čvrstoće prilikom izrade savremenih konstrukcija iziskuje poseban osvrt na ocenu pogodnosti tih materijala za zavarivanje, odnosno ocenu njihove zavarljivosti.

Pojam zavarljivosti metala obuhvata sveukupnost karakteristika osnovnog metala koje su određene njegovim odnosom prema promenama koje se odigravaju pri zavarivanju i sposobnosti da se uz izabrani tehnološki režim obezbedi sigurnost u eksploataciji zavarenog spoja [32]. Pored osobina osnovnog metala, zavarljivost je određena i elementima tehnološkog postupka zavarivanja (način zavarivanja, režim zavarivanja, sastav dodatnog materijala za zavarivanje, tip i karakter zaštite i dr.).

Imajući u vidu da je zavarljivost definisana nizom pokazatelja, jasno je da od vrste čelika i uslova eksploatacije zavarene konstrukcije zavisi i skup pokazatelja koji definišu zavarljivost. Što je viša čvrstoća čelika i što su složeniji uslovi eksploatacije, to je i veći broj pokazatelja zavarljivosti, pa se samim tim povećava i obim ispitivanja koji treba obaviti, jer svako ispitivanje osvetljava samo deo ove kompleksne karakteristike materijala.

Obim ispitivanja, odnosno izbor metoda za ocenu zavarljivosti čelika zavise od namene konstrukcija i osobina osnovnog i dodatnog materijala za zavarivanje. Po pravilu, povećanje stepena legiranja i čvrstoće čelika doprinosi pogoršanju njegove zavarljivosti [33].

Sigurno je da je napredak u tehnologiji zavarivanja, uvođenje novih postupaka zavarivanja i programiranih termičkih režima, mnoge materijale loše zavarljivosti preveo u grupu zadovoljavajuće zavarljivosti, ali ostaje činjenica da ukoliko je materijal kvalitetniji, to je i broj podataka koji ocenjuju zavarljivost veći a njihove međusobne zavisnosti složenije.

Niskolegirani čelici visoke čvrstoće se uspešno zavaruju, mada spadaju u grupu teže zavarljivih materijala. Nametnuta primena čelika visoke čvrstoće zahteva razradu metodologije istraživanja njihove zavarljivosti. Kao pokazatelji zavarljivosti čelika služe metode koje se koriste za ocenu: otpornosti metala šava i zone uticaja toplote na obrazovanje prslina, otpornost osnovnog metala, zone uticaja toplote, metala šava i zavarenog spoja u celini prema prelazu u krto stanje, mehaničko - tehnoloških i strukturnih karakteristika metala šava i zavarenog spoja.

Najopasnije greške u zavarenim spojevima su prsline, koje nastaju kao posledica toplotnih i metalurških procesa.

Kao prvi, ili jedan od prvih koraka ka ocenjivanju zavarljivosti čelika je ocena otpornosti materijala prema stvaranju prslina, s obzirom da je to svakako najvažniji faktor koji karakteriše zavarljivost.

Greške tipa prslina u zavarenim spojevima mogu se, sa gledišta temperaturne oblasti njihovog nastanka, podeliti u četiri osnovne grupe [34]:

1. Tople prsline, nastale za vreme hlađenja sa visokih temperatura koje su omeđene temperaturom solidusa pa do oko 800 °C.
2. Hladne prsline, nastaju posle završenog zavarivanja na temperaturama martenzitnog preobražaja (200 – 300 °C).
3. Prsline usled žarenja, nastaju posle zavarivanja prilikom termičke obrade zavarenih spojeva.
4. Lamelarno cepanje (lamelarne prsline), koje se mogu inicirati na višim temperaturama, a posledica su prisustva nečistoća i njihovog nepovoljnog rasporeda u zoni uticaja toplote.

Tople prsline nastaju tokom primarne kristalizacije šava ili pri hlađenju iznad polovine vrednosti temperature topljenja i međukristalnog su tipa. Hladne prsline nastaju u MŠ ili ZUT, najčešće pri kraju hlađenja zavarenog spoja, ispod 300 °C. Prsline od žarenja nastaju usled ponovnog zagrevanja u ZUT ili MŠ tokom termičke obrade posle procesa zavarivanja legiranih čelika. Laminarne prsline su posledica dejstva zateznih napona u pravcu debljine zavarenog spoja, nastalih pri termičkom ciklusu zavarivanja. [35]

Često puta nastala prslina nije čista greška jednog tipa. Može se inicirati kao jedan tip a da se širi kao drugi tip. U cilju boljeg razumevanja osnovnih mehanizama nastajanja i pojave prslina razmotriće se navedeni tipovi pojedinačno.

Mehanizam obrazovanja i osnovni uticajni faktori na pojavu prslina u zavarenim spojevima opisan je u literaturi [13, 34-42]

## 2.2. Simulacija zone uticaja toplote

Zbog velike brzine zagrevanja i hlađenja, zavarivanje, u celini gledano, predstavlja neravnotežni proces, tako da sve fazne i strukturne promene koje se pri zavarivanju odigravaju protiču u uslovima pregrevanja ili pothlađenja.

Na mestu obrazovanja spoja pri zavarivanju čelika topljenjem odigrava se čitav niz elementarnih i kompleksnih procesa koji uslovljavaju pojavu razlika u sastavu, strukturi i nivou prisutnih naprezanja u sastavnim delovima zavarenog spoja, metalu šava (MŠ) i zoni uticaja toplote (ZUT) u odnosu na osnovni metal (OM) [43].

Pri tome ostvarene razlike, koje zavise od fizičko-hemijskih osobina osnovnog i dodatnog metala, tehnologije zavarivanja i konstrukcije zavarenog spoja, predstavljaju meru za ocenu značajne tehnološke karakteristike čelika, poznate pod nazivom zavarljivost [32, 44].

### 2.2.1. Mehaničko - tehnološke osobine zavarenog spoja

Mehaničko - tehnološke osobine zavarenog spoja zavise kako od osobina metala šava, tako i od osobina zone pod uticajem toplote i osnovnog metala. Ove osobine zavise od strukture pojedinih delova zavarenog spoja koja je određena hemijskim sastavom, termičkim ciklusom zavarivanja i prethodnom odnosno naknadnom termičkom obradom.

Hemijski sastav metala šava zavisi od udela osnovnog i dodatnog metala u metalu šava i međusobnog delovanja metala, troske i gasova. U zavisnosti od interakcije ovih relevantnih faktora, čvrstoća metala šava može biti na nivou čvrstoće osnovnog metala (mismečing), iznad (overmečing) ili ispod (undermečing) nivoa čvrstoće osnovnog metala. [45-51]

Pri zavarivanju niskolegiranih čelika sastav metala šava se ne razlikuje bitno od sastava osnovnog metala. U metalu šava je niži sadržaj ugljenika da bi se sprečila pojava struktura sklonih zakaljenju pri povećanim brzinama hladjenja. S obzirom da smanjenje sadržaja ugljenika u metalu šava negativno utiče na čvrstoću, ovaj nedostatak se nadoknađuje legiranjem metala šava sa drugim elementima koji povećavaju čvrstoću

kroz dodatni materijal, oblogu ili prašak. Pri ovome ne treba zanemariti ni legiranje metala šava istopljenim osnovnim materijalom [13].

Postupak i režim zavarivanja značajno utiču na osobine metala šava s obzirom da od njih zavisi i struktura metala šava a i hemijski sastav. Od primenjenog postupka i režima zavarivanja zavisi udeo osnovnog metala u metalu šava i taj odnos može da varira od 15 - 80 % [13].

Na porast granice razvlačenja metala šava povoljno utiče i plastična deformacija metala šava koja se javlja kao posledica napona izazvanih zavarivanjem. Kod zavarivanja u više prolaza, metal šava (osim poslednjeg prolaza) izložen je povratnom delovanju termičkog ciklusa zavarivanja pa zato ima povoljniju sitnozrnastu strukturu. Kao posledica toga metal šava višeprolaznih šavova ima nižu prelaznu temperaturu i bolje osobine plastičnosti.

Kada su u pitanju osobine zavarenog spoja, **mного veći problem je promena metalurško - tehnoloških osobina u zoni uticaja toplote, odnosno pad plastičnosti u zoni uticaja toplote.**

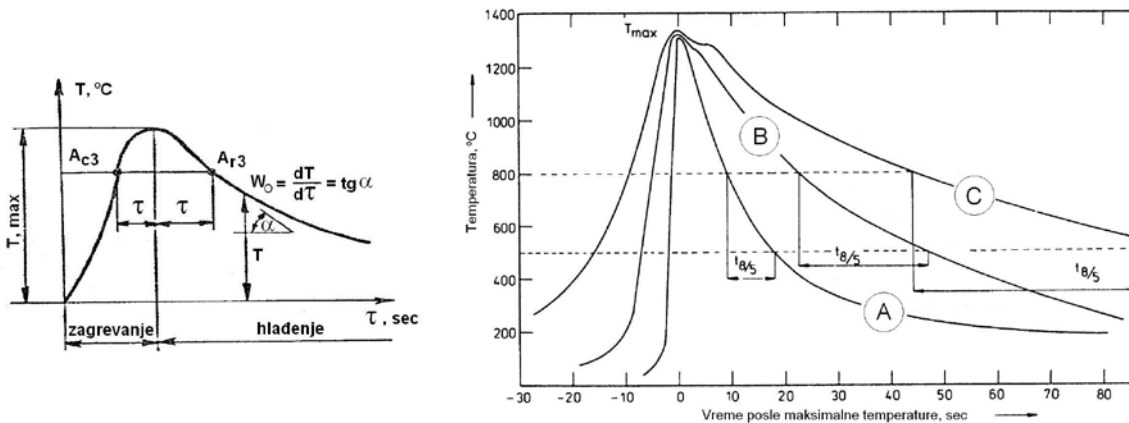
### 2.2.2. Zona uticaja toplote

Struktura i osobine osnovnog metala u zoni uticaja toplote zavise od hemijskog sastava osnovnog metala i od termičkog ciklusa zavarivanja.

Termički ciklus zavarivanja predstavljen preko dijagrama kontinuiranog hlađenja, sl. 2.1, je osnovni kriterijum ocene uticaja parametara režima zavarivanja na promenu strukture u osnovnom metalu, sl. 2.2, koji se podvrgava toplotnom dejstvu pri zavarivanju.

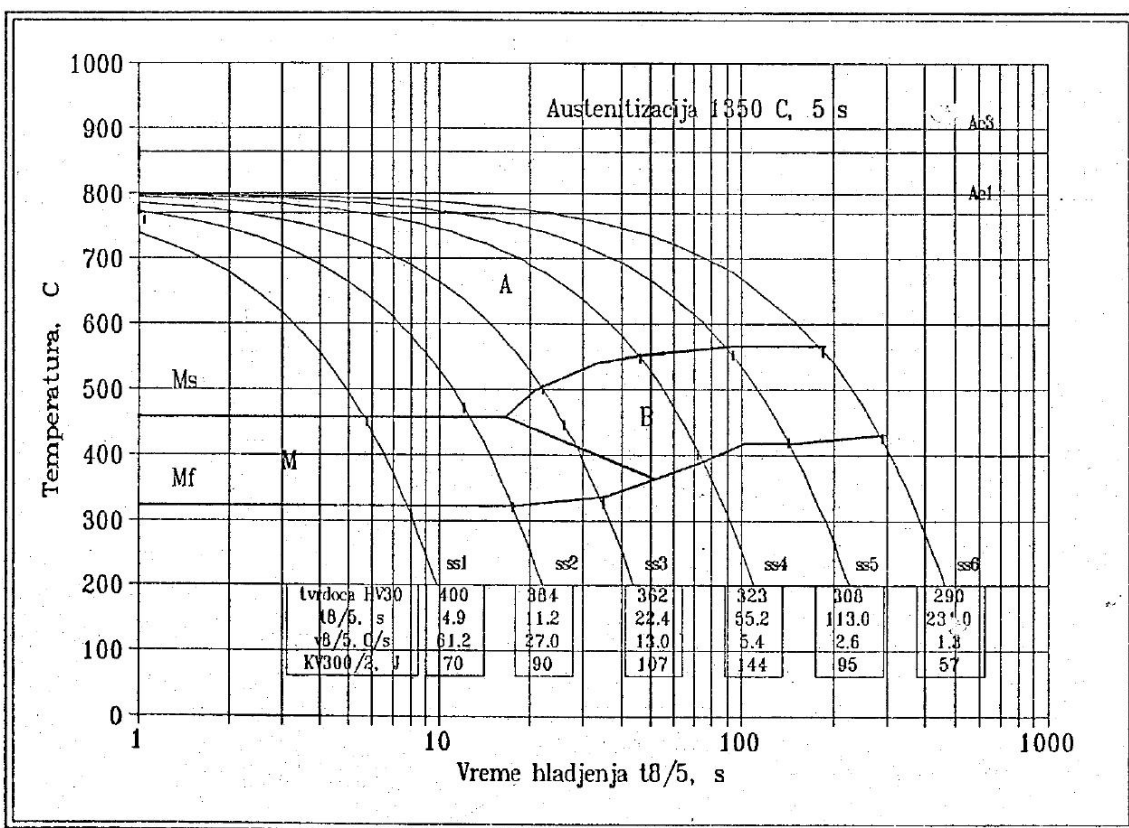
**Osnovni parametri termičkog ciklusa zone uticaja toplote su:** maksimalna temperatura zagrevanja, brzina zagrevanja kroz temperaturno područje 700 - 1000 °C, brzina hlađenja kroz temperaturno područje 800 – 500 °C, vreme zagrevanja od  $A_{c3}$  do maksimalne temperature, vreme hlađenja od maksimalne temperature do temperature  $A_{r3}$ . Širina i konačna struktura različitih delova zone pod uticajem toplote određena je načinom i režimom zavarivanja, sastavom i debljinom osnovnog metala.

Transformacije u zoni uticaja toplote se obavljaju u uslovima neprekidne izmene temperatura, deformacija i naprezanja usled neravnomernog zagrevanja i hlađenja metala pri zavarivanju.



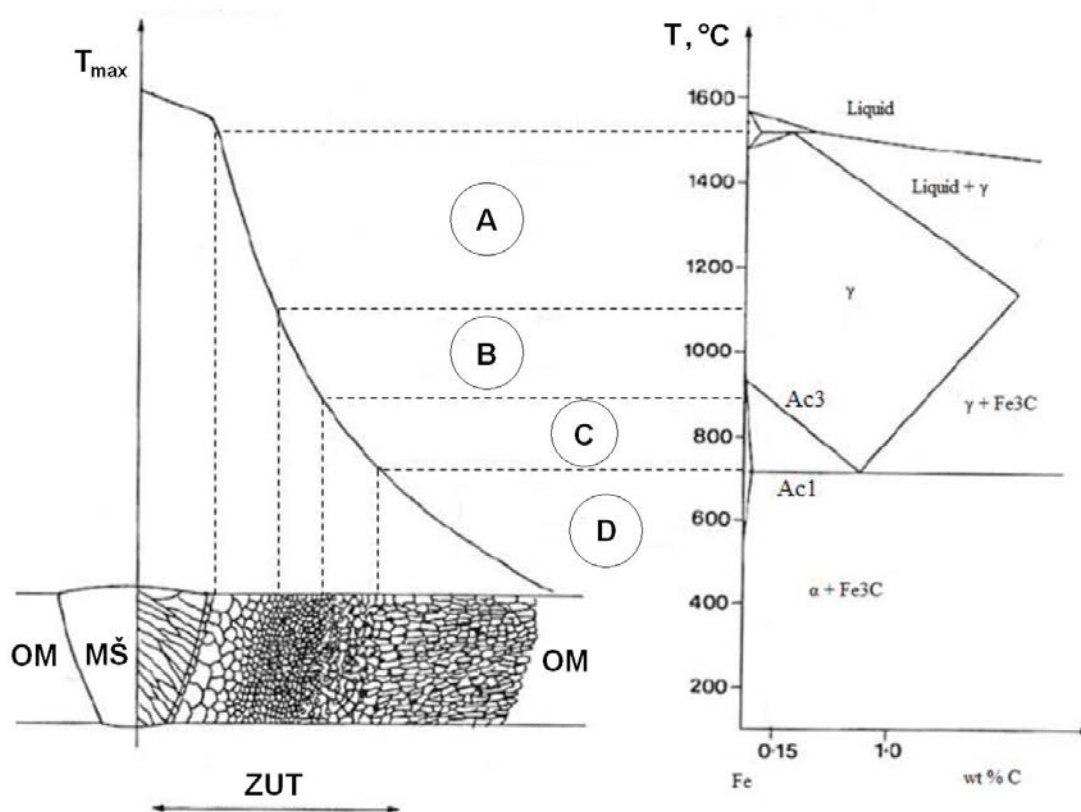
Šema termičkog ciklusa zone pod uticajem toplote pri elektroflučnom zavarivanju [13]

Šema termičkog ciklusa zone pod uticajem toplote za različite postupke zavarivanja [52]  
 A – ručno elektroflučno zavarivanje, B – zavarivanje pod praškom, C – zavarivanje pod šljakom



Dijagram kontinuiranog hlađenja izrađen na simulatoru zavarivanja za čelik NN-70, temperatura austenitizacije 1350 °C, vreme austenitizacije 5 s [53]

Slika 2.1. Termički ciklusi zavarivanja i dijagram kontinuiranog hlađenja



A - grubozrni ZUT (Grain coarsened HAZ, CGHAZ), B - finozrni ZUT (Grain refined HAZ, RGHAZ), C – interkritični ZUT (Intercritical HAZ, ICHAZ), D – subkritični ZUT (Subcritical HAZ, SCHAZ), OM – osnovni metal, MŠ – metal šava, ZUT – zona uticaja toplote

Slika 2.2. Definisiranje regiona u zoni uticaja toplote [54, 55]

Zbog toga je jedna od osnovnih teškoća **pri zavarivanju niskolegiranih čelika visoke čvrstoće pojava pada plastičnosti i žilavosti u zoni uticaja toplote.** [13]

Najveći značaj imaju strukturne transformacije koje se javljaju neposredno uz liniju topljenja sa strane osnovnog metala. To je deo zone pod uticajem toplote koji zahvata zapreminu metala koja se u procesu zavarivanja zagrevala na temperaturama između  $T_s$  (s - solidus) i  $T_l$  (l - likvidus) U toj oblasti dolazi do delimičnog rastapanja osnovnog metala. Odvojena nerastopljena zrna pri tome su razdvojena tečnim proslojcima, povezanim sa tečnom fazom kupatila. U tu zonu u procesu zavarivanja delimično mogu prodreti i elementi koji su uvođeni u rastopljeni metal kroz dodatni metal a osnovni ih nije sadržavao. Zato po hemijskom sastavu ta zona može da se razlikuje od sastava osnovnog metala [13].

U pregrejanom delu ZUT-a gde se temperatura kreće u intervalu 1100 – 1400 °C, do linije solidusa, metal potpuno prelazi u austenitnu strukturu. Pri tome dolazi do

porasta zrna, čije se dimenzije povećavaju utoliko više što je temperatura viša od  $A_{c3}$  temperature. Čak veoma kratko vreme provedeno na temperaturi iznad  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  dovodi do znatnog porasta veličine zrna, što se posle hlađenja obično manifestuje kao grubo zrna zakaljena struktura, koja je najkritičnija sa stanovišta pada plastičnosti u ZUT-u.

U području normalizacije metal se zagreva neznatno iznad temperature  $A_{c3}$  i zato ima sitnozrnu strukturu sa visokim mehaničkim osobinama.

Ako su u niskolegiranim čelicima prisutni elementi koji usporavaju proces raspada austenita, u procesu hlađenja oni deluju u istom pravcu kao i povećanje brzine hlađenja. Zbog toga se mogu stvoriti strukture kaljenja i u delu ZUT-a gde se metal zagreva iznad  $A_{c1}$  temperature, pri povećanim brzinama hlađenja [13].

Deo osnovnog metala koji je zagrejan na temperaturama ispod  $A_{c1}$  temperature pretrpi neznatne razlike u strukturnom pogledu.

Izvršena podela na zone je uslovna. Prelaz od jednog strukturnog stanja na drugo ide preko međustruktura. Takođe treba da se uzme u obzir da realno temperaturno stanje nije statično i da se menja u svakoj tački ZUT-a.

Izrada složenih, visoko odgovornih zavarenih konstrukcija podrazumeva znatno oštrije kriterijume prihvatljivosti grešaka i što pouzdanije utvrđivanje stvarnih mehaničkih osobina svih zona unutar ZUT. [45]

Kod zavarivanja niskolegiranih čelika visoke čvrstoće, najkritičnije mesto ZUT-a, sa stanovišta pada plastičnosti, je deo zone gde je najizraženiji proces pregrevanja i zakaljenja. Taj deo je i najverovatnije mesto pojave prslina.

Tehnologija zavarivanja niskolegiranih čelika visoke čvrstoće mora predvideti u zoni uticaja toplote minimalnu mogućnost pojave zakaljivih struktura. Kod zavarivanja termički poboljšanih čelika, moraju se primeniti mere u cilju sprečavanja gubitaka čvrstoće u zoni otpuštanja.

Dobijanje dobrog zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće uz dobro poznavanje svih struktura i međustruktura zone uticaja toplote i njihovog uticaja na osobine zavarenog spoja veoma je složen zadatak. [13]

Uspešna primena čelika povišene čvrstoće zavisi od postignutih osobina zone uticaja toplote (ZUT) prilikom zavarivanja, što treba uzeti u obzir pri oceni sigurnosti zavarene konstrukcije [56, 57].

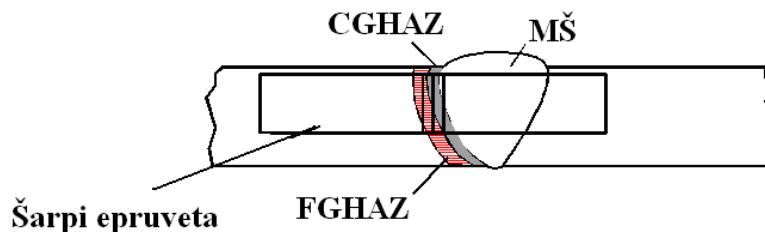
Zbog malih dimenzija ZUT, otežano je ispitivanje na zavarenom spoju [58].



U vreme kada postupci zavarivanja i ispitivanja metala nisu bili tako razvijeni kao danas, određivanje mehaničkih svojstava unutar ZUT, rešavalo se ispitivanjem mikro epruveta is pojedinih zona unutar ZUT. Rezultati takvih ispitivanja, i tada su se uzimali sa rezervom, jer je bilo jasno da i u prečniku mernog dela epruvete od 0,8 mm, može biti zahvaćeno više zona unutar ZUT. Takođe, kod tako dobijenih rezultata veoma je bio važan uticaj dimenzija epruvete na dobijene rezultate. Danas, ovakav pristup ispitivanju mehaničkih svojstava ZUT, smatra se zastarelim. [45]

Zbog teškoća da se definiše položaj kritične mikrostrukture i da se locira vrh zarez a i prsline, određivanje kritičnih osobina ZUT je složeno, pa je određivanje parametra lokalnog ponašanja metala, kao što je žilavost loma, otežano.

Na sl. 2.3, prikazan je položaj zarez a na epruveti za ispitivanje udarne žilavosti ZUT, i vidi se, čak i kada je idealno postavljen, zarez svojom dužinom po pravilu pokriva više zona unutar ZUT. Ovaj problem se javlja i kod K šava zavarenog spoja, koji je najpogodniji za određivanje energije udara ZUT. S obzirom da je radijus na vrhu zarez a 0,25 mm, jasno je da i vrh zarez a lako može zahvatiti više zona, odnosno različitih mikrostrukture, unutar ZUT.



Slika 2.3. Položaj Šarpi epruvete, odnosno položaj zarez a u ZUT-u [45]

Pri analizi rezultata ispitivanja zamorom, ZUT zavarenog spoja, treba imati u vidu sledeće:

- struktura područja ZUT u kome se nalazi vrh zamorne prsline zavisi od termičkog ciklusa, koji je uslovljen brojem prolaza pri zavarivanju i količinom unete toplote;
- pri ispitivanju, prsline se razvija kroz različita strukturna područja;
- iako zamorne prsline lociramo na različitim rastojanjima od linije stapanja, nije izvesno da će njihov vrh pasti u područje kritične žilavosti;
- kritična područja u ZUT, koja su po pravilu male veličine, mogu biti okružena područjima veće duktilnosti [58].

Termičkom simulacijom, zagrevanjem do određene temperature i programiranim hlađenjem, se na uzorcima dobija mikrostruktura različitih područja ZUT [59], (SZUT –

simulirani ZUT), što nam olakšava ispitivanje i omogućava neposredno donošenje odgovarajućih zaključaka za realnu ZUT nekog zavarenog spoja.

### 2.2.3. Termička simulacija zone uticaja toplote

Simulirana zona uticaja toplote (SZUT) može se dobiti zagrevanjem uzoraka do željene temperature u peći ili na termomehaničkom simulatoru zavarivanja.

Simulator zavarivanja je uređaj kojim se postiže kontrolisano zagrevanje i hlađenje, slično onom pri zavarivanju. Razlika je u tome da se na uzorku dimenzija  $10 \times 10 \times L$  mm ( $L$  – dužina uzorka zavisi od toga za koja ispitivanja se simulirani uzorci pripremaju;  $L=60$  mm za udarna ispitivanja;  $L=90\div 100$  mm za zatezna i zamorna ispitivanja), odnosno na njegovom srednjem delu, dobije mikrostruktura širine oko 10 mm, kao mikrostrukutra koja odgovara zoni iz ZUT, što omogućava utvrđivanje njenih osnovnih mehaničkih osobina [60].

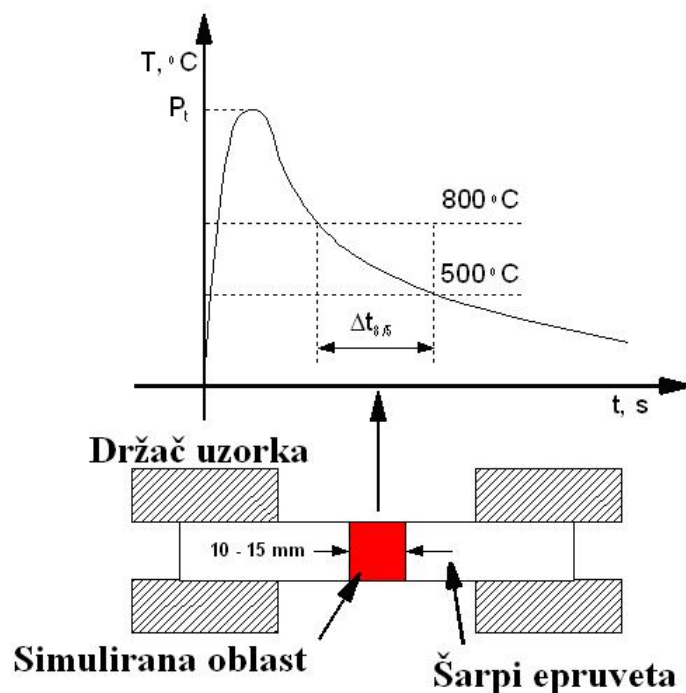
Unos parametara se izvodi preko računara, a osnova za izbor parametara može biti proračun temperaturnog polja, odnosno korišćenje odgovarajućih **jednačina za izračunavanje**  $\Delta t_{8/5}$  u zavarivačkom termičkom ciklusu. Poreklo parametara može biti i eksperimentalno, kroz merenje temperaturnog ciklusa uz pomoć termoparova. [53, 61]

Toplotni ciklusi na simulatoru zavarivanja postižu se elektrootpornim grejanjem prema zadatom vremenskom planu i njima se upravlja pomoću fotoćelije praćenjem zadate krive hlađenja, sl. 2.4. Kroz epruvetu se propušta unapred zadata i podešena struja zagrevanja sve dok se epruveta ne zagreje do maksimalne temperature. Čeljusti u kojima se nalazi uzorak hlade se vodom a sam uzorak mlazom inertnog gasa ili mlazom ugljen-dioksida.

Ukoliko to zahtevaju realni uslovi zavarivanja, moguće je uraditi i dvostruki odnosno višestruki ciklus simulacije.

Zbog heterogenosti strukture i osobina zavarenog spoja nije jednostavno rezultate ispitivanja simuliranih uzoraka neposredno primeniti na zavareni spoj, naročito ako se uzme u obzir da u realnim zavarenim spojevima dolazi do naknadnih faznih transformacija pri drugom i sledećim prolazima. Kod višeprolaznog zavarivanja, preklapanje toplotnih ciklusa profinjuje mikrostrukturu ZUT, što se manifestuje ne pojavljivanjem lokalnih krutih zona. Međutim, ovo preklapanje može izazvati takvu

kombinaciju toplotnih ciklusa koji stvaraju nove martenzitno-austenitne konstituyente. To znači da je kod višeprolaznog zavarivanja, osim unosa toplote veoma važna i kombinacija toplotnih ciklusa, pa preporuke unosa toplote treba da su zasnovane na ispitivanju simuliranih uzoraka [58].



Slika 2.4. Shematski prikaz simulacije zone uticaja toplote zavarenog spoja [45]

Kao osnova za poređenje može se uzeti mikrostruktura simuliranog uzorka i odgovarajuća mikrostruktura u ZUT, i tom području ZUT pripisati rezultati dobijeni simuliranim uzorcima [58, 62, 63]. Može se očekivati da zrna blizu linije stapanja budu finija u stvarnom zavarenom spoju, nego u uzorku simuliranog zavara, gde nema ponovnog zagrevanja [58, 62].

I pored svojih očiglednih prednosti, udarna ispitivanja simulirane zone uticaja toplote ne mogu zameniti udarna ispitivanja ZUT realnog zavarenog spoja, sl. 2.3.

Na sl. 2.3 se vidi, da zarez na Šarpi epruveti prolazi kroz više zona unutar ZUT, dok je epruveta na sl. 2.4 homogenije mikrostrukture u svom radnom delu, dužine oko 10 mm, pa se kod epruveta uzorkovanih sa stvarnih zavarenih spojeva dobijaju veće vrednosti energije udara u odnosu na odgovarajuće simulirane epruvete. Zbog toga, kad god je moguće, treba kombinovati ispitivanja, simuliranih epruvetama sa standardnim ispitivanjima, mehaničkih osobina zavarenog spoja.

### 2.3. Uticaj zamora na ponašanje materijala

Postojanje prslina u nosećem mašinskom delu je nedopustivo sa stanovišta klasičnog inženjerskog pristupa. Međutim, pod određenim uslovima, kada je reparacija moguća i tehnoekonomska isplativa, može se tolerisati pojava prslina, odnosno nepotpunog loma, ako se pouzdano utvrdi da se nastala prslina neće razvijati do potpunog loma. U protivnom deo se izbacuje iz upotrebe.

Dinamičko razaranje mašinskog dela, može se podeliti na fazu razaranja zamaranjem do nastanka inicijalne zamorne prsline i fazu širenja inicirane prsline, sl. 2.5. Prva faza razaranja se proučava u oblasti zamora, visokocikličnog i/ili niskocikličnog, a druga u mehanici loma, pri čemu je granica između njih određena pojavom inicijalne zamorne prsline [12].



Slika 2.5. Karakteristike dinamičkog razaranja i zamorne prsline u njenom razvoju

Za detekciju zamorne prsline najčešće se koriste razna tehnička sredstva određene osetljivosti. Zbog ograničenih sposobnosti operatera i tehničkih sredstava za otkrivanje prslina, inicijalnu zamornu prslinu je praktično nemoguće otkriti. Od praktičnog je značaja najmanja zamorna prslina koja može da se otkrije metodama ispitivanja bez razaranja (IBR) (radiografija, neutronska difrakcija, ultrazvuk, magnetne čestice ili penetranti), a naziva se prag IBR (pIBR) ili tehnička zamorna prslina (tzp) [64-68], sl. 2.5. To je prslina određene dužine, od 0,1 do 1 mm ili određene površine, od 0,01 do 1 mm<sup>2</sup> [65] i to će nam, u ovom radu, poslužiti kao osnova za određivanje stabilizovane histereze kod ispitivanja otpornosti na niskociklični zamor (NCZ).

Da bi se postigla željena sigurnost neće se prihvatiti deo koji sadrži prslinu veću od one koja je na slici 2.5 označena sa "granica prihvatljivosti". Naravno, granica prihvatljivosti mora biti veća od praga IBR, jer samo u tom slučaju može biti otkrivena. U isto vreme ona mora biti manja od veličine prsline koja odgovara nivou stabilnog početnog širenja prsline " $K_i$ ". Ako je zbog subjektivne greške kontrole ili zbog nekog nepredviđenog uticaja početna greška nešto veća od granične za početak stabilnog širenja prsline, onda će se ona u radnim uslovima stabilno povećavati zbog procesa kod plastičnih materijala (nivo početne žilavosti za taj proces označen je sa  $K_i$ ). Ovaj proces se ubrzava kada prslina dostigne veličinu pri kojoj postaje aktivni mehanizam korozije pod naponom (ovaj nivo je označen sa  $K_{Isc}$ ). Ako je prslina ostala neotkrivena i u narednim kontrolama, ona može lako da dostigne kritičnu veličinu (označenu sa  $K_{Ic}$ ), pri kojoj pojava loma više nije kontrolisana. U toj tački dolazi do katastrofalnog loma [69].

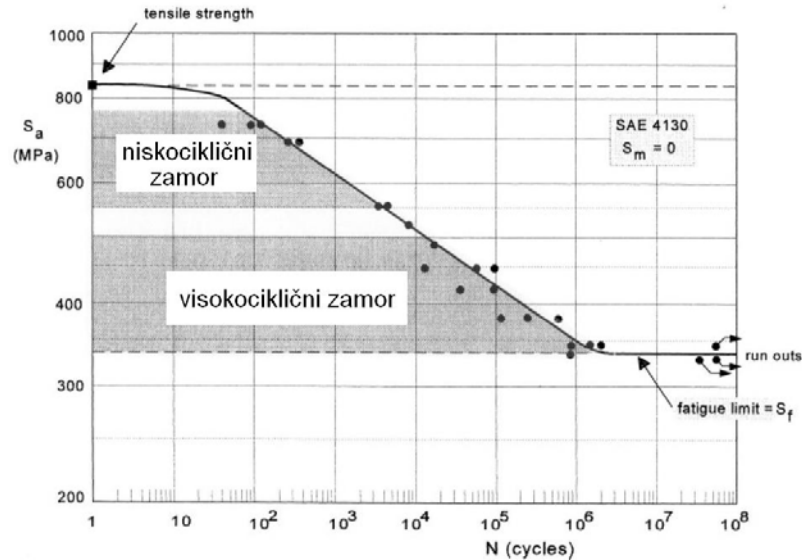
### 2.3.1. Vrste zamora materijala

Zamor materijala je pojava postepenog razaranja, koja nastaje dugotrajnim dejstvom periodično, odnosno ciklično promenljivih naprezanja [70], a rezultira stvaranjem prsline.

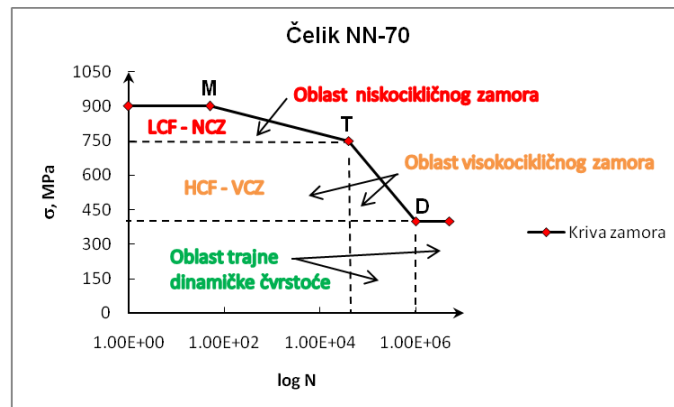
Zavisno od materijala i njegovih mehaničkih osobina, nivoa ciklično promenljivih naprezanja, napona ili deformacija, izvršena je sistematizacija postupaka ispitivanja zamaranjem. Ako se radi sa konstantnim nivoima odgovarajućih napona, to spada u oblast klasičnog, visokocikličnog zamora (VCZ) Wöhler-ovskog tipa, sl. 2.6. U ovoj oblasti može da postoji trajna dinamička čvrstoća pri čemu sa nižim nivoima napona u radu ne dolazi do pojave zamora, i delovi imaju praktično neograničeno dug radni vek. Pri višim nivoima napona kada posle određenog broja ciklusa nastane zamorna prslina, radni vekovi delova postaju ograničeni na broj ciklusa do prsline, odnosno loma. Ovakvi nivoi odgovaraju oblasti vremenski odnosno ciklično ograničene dinamičke čvrstoće.

Daljim povećanjem nivoa ciklično promenljivog napona dostiže se granica tečenja gde, posle određenog broja ciklusa ili čak od početka, mogu postojati i male makro plastične deformacije koje znatno snižavaju broj ciklusa do nastajanja prsline ili

loma. Ova oblast zamora sa visokim nivoima napona i odgovarajućim makro deformacijama i sa izraženim malim brojem ciklusa do nastanka zamorne naprsline naziva se niskociklični zamor (NCZ), sl. 2.6.



a) Čelik, SAE 4130 [72,73]



M - zatezna čvrstoća, T - napon tečenja,  
D - trajna dinamička čvrstoća

b) Čelik, NN-70 [71]

Slika 2.6. Rezultati ispitivanja zamaranjem na epruvetama bez zarezá

Ona se proteže od samo nekoliko ciklusa do oko  $(1 - 5) \cdot 10^4$  ciklusa, kad makro plastične deformacije postaju preovlađujuće u procesu zamaranja. Dok se proces visokocikličnog zamaranja upravlja amplitudama opterećenja ili napona, u ovoj oblasti proces zamaranja se upravlja nivoima amplituda deformacija. Tako se u niskocikličnoj oblasti i proces zamaranja pri radu delova i konstrukcija obavlja takođe u uslovima

upravljanih deformacija. Granica između niskocikličnog i visokocikličnog zamora nije definisana tačno određenim brojem ciklusa, sl 2.6a [73].

Najveća razlika između dva stanja zamora je ta što je niskociklični zamor povezan s makroplastičnom deformacijom u svakom ciklusu, dok se visokociklični zamor više odnosi na elastično ponašanje materijala na makro skali. Zapravo, visokociklični zamor je češći slučaj u praksi, dok je niskociklični zamor povezan s određenim strukturama i spektrima opterećenja.

### 2.3.1.1. Stvaranje zamorne prsline

Koncept stvaranja prsline pri zamoru je korišćen u inženjerskoj praksi još od doba kada je uočena ta lokalna pojava oštećenja i/ili loma pre više od jednog veka. Pri tome se smatra da se ukupni vek komponente sa zarezom ( $N_t$ ) sastoji od broja ciklusa ( $N_i$ ) potrebnog za stvaranje, inicijaciju, prsline i broja ciklusa potrebnog za rast, propagaciju, prsline do loma ( $N_p$ ):

$$N_t = N_i + N_p \quad (2.1)$$

Na osnovu dosadašnjih saznanja o fizičkoj osnovi procesa stvaranja i rasta prsline, vek rada do loma komponente se može podeliti u četiri faze, sl. 2.7 [74]:

**Faza 1:** Stvaranje ili inkubacija prsline sve do pojave značajnog diskontinuiteta u mikrostrukтури materijala. Treba imati u vidu da takav diskontinuitet može da postoji u materijalu od početka nastanka u vidu prirodne greške.

**Faza 2:** Period rasta prsline koji zavisi od lokalne mikrostrukture i geometrije (npr. zareza), poznat još kao period rasta "kratke" prsline. U ovom periodu rast prsline nije kontinualan i može da bude zaustavljen nekom mikrostrukturnom preprekom.

**Faza 3:** Konstantan rast prsline - funkcija geometrije prsline i napona. Rast prsline je kontinualan i može se povezati sa ponašanjem "duge" prsline i odgovarajućim standardizovanim svojstvima materijala.

**Faza 4:** Završna faza sa velikim neelastičnim deformacijama i duktilnim lomom, na koji se ne može primeniti mehanika loma. Krajnji rezultat je nestabilni rast prsline, ili plastični kolaps komponente.



Slika 2.7. Faze stvaranja i rasta prsline do loma komponente

Usled zamora, u prvoj fazi rada, mašinskog elementa ili dela, nastupa razaranje njegovog materijala cikličnim elasto-plastičnim deformisanjem mikro strukture čak i u oblasti elastičnosti. Pri tome su makro elastična svojstva materijala i integritet, odnosno celina mašinskog elementa ili dela, na makro nivou skoro potpuno očuvani. Ovaj skriveni proces razaranja odvija se sve dotle dok nastale trajne promene u mikrostrukтури u nekoj maloj lokalnoj oblasti kao makro tački ne dostignu kritične vrednosti. Tada nastaje prekid koji na makro nivou predstavlja zamornu prslinu, odnosno početak razaranja dela.

U drugoj fazi postoje dve vrste makrorazaranja: nastavak zamaranja u neprekinutim tačkama materijala i postepeno ciklusno razaranje sa svojom zakonitosti širenja same prsline. Prslina se u tekućim ciklusima povećava i dobija konačnu veličinu i oblik i pri određenoj veličine može se detektovati nekim preciznim tehničkim uređajima, a zatim registrovati i pratiti po daljim ciklusima. Dobijeni rezultati su značajni zato što pružaju mogućnost ocene brzine širenja prsline posle njenog nastanka. Ovo je važno kada je potrebno ekstremno iskorišćenje kapaciteta postojeće nosivosti materijala i kada se u radu dela može dopustiti nastanak prsline čak i nastaviti sa radom do prsline strogo određene i kontrolisane veličine.

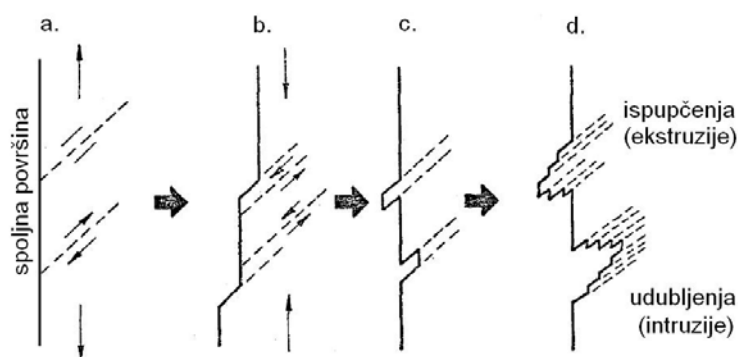
Do inicijacije prsline u slučaju zamora dolazi zbog interakcije dislokacija sa tačkastim, linijskim, površinskim i prostornim preprekama u strukturi materijala. Na mestima interakcija vremenom dolazi do zasićenja dislokacijskih defekata. Kao posledice zasićenja javljaju se prsline.



### 2.3.1.2. Mehanizam stvaranja zamorne prsline

Zamorna prsline se stvara pri promenljivom opterećenju kao rezultat plastične deformacije [29].

Do zamora dolazi i pri nazivnom naponu nižem od granice razvlačenja, zato što se vrednost granice razvlačenja povećava usled koncentracije napona u makro oblasti (npr. zarez – promena geometrije) ili u mikro oblasti (npr. uključci, mikropore). Na sl. 2.8, prikazan je model [75], koji objašnjava pojavu zamorne prsline posle lokalne plastične deformacije.

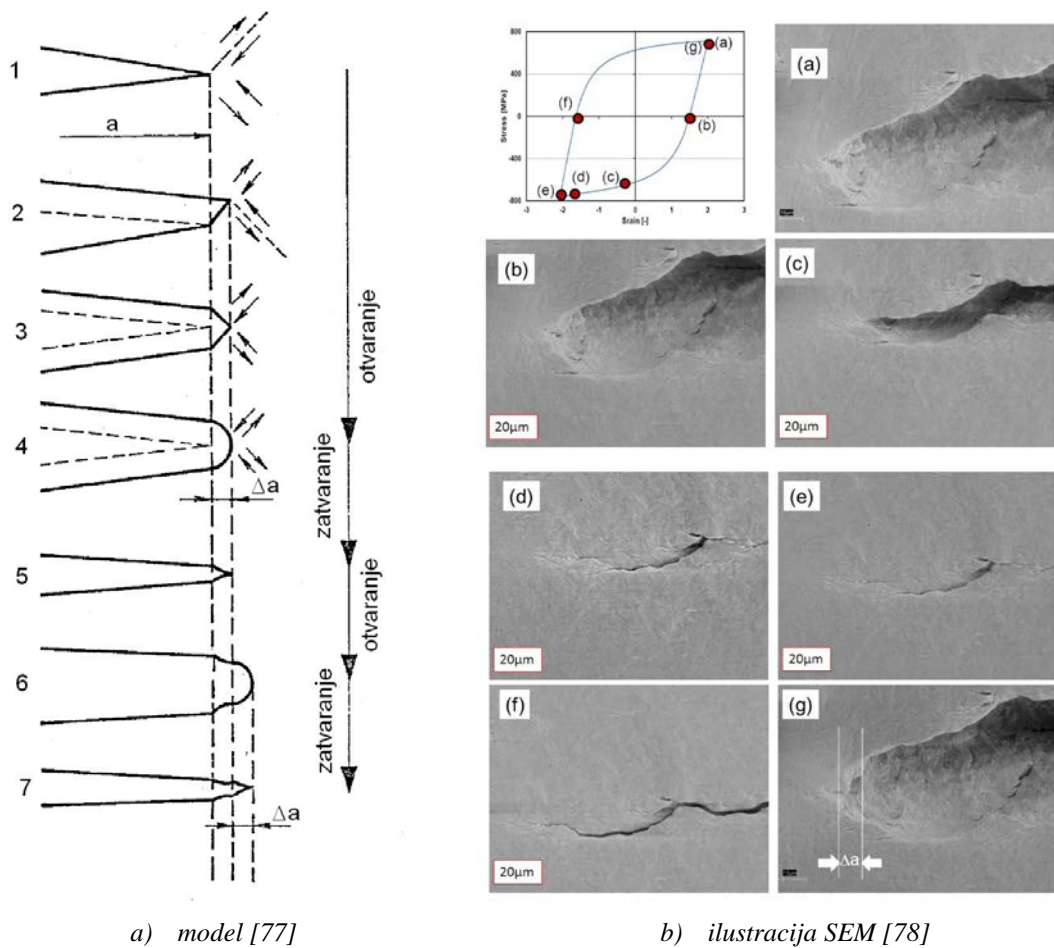


Slika 2.8. Model za razvoj ekstruzija i intruzija koje prethode zamornoj prslini [75]

Pod dejstvom zateznog opterećenja dolazi do klizanja po pogodno usmerenim ravnima klizanja, sl. 2.8a, dok pod dejstvom pritisknog opterećenja klizanje se odvija u suprotnom smeru po paralelnim ravnima, sl. 2.8b, jer je klizanje po prvobitnim ravnima ometeno zbog deformacijskog ojačavanja materijala i zbog oksidacije novo stvorenih slobodnih površina.

Prvi ciklus opterećenja može dovesti do pojave jednog ispupčenja i jednog udubljenja, sl. 2.8c. Na mestu udubljenja se u narednim ciklusima može pojaviti prsline zbog stalnog povećavanja udubljenja, sl. 2.8d. Ovaj mehanizam deluje i kada je raspon promenljivog opterećenja u zatezanju, jer plastična deformacija izazvana u fazi porasta opterećenja uslovljava zaostali napon pritiska u fazi smanjenja opterećenja.

Iako je predloženi model Vuda [75] jednostavan, naročito ako se uzme u obzir složena polikristalna mikro-struktura metala, ipak predstavlja dobru osnovu za dalje razmatranje mehanizma napredovanja zamorne prsline, zasnovanog na povratnom klizanju [76].



a) model [77]

b) ilustracija SEM [78]

Slika 2.9 Model rasta zamorne prsline sa ilustracijom

Na sl. 2.9 prikazano je napredovanje zamorne prsline [77, 78] prema fazama:

- **faza 1 i 2 (f)** - na vrhu oštre prsline, izložene zatezanju, deluje koncentracija napona, dolazi do klizanja u pravcu maksimalnog tangencijalnog napona,
- **faza 3 (a)** - vrh prsline se otvara, povećava se dužina prsline do veličine koja odgovara uspostavljenom stanju napona i deformacije; stvoreni su uslovi da dođe do klizanja i u ravni pod uglom od  $90^\circ$  prema ravni prvobitnog klizanja,
- **faza 4 (a)** - zbog ojačavanja materijala i povećanog napona pojavljuju se i druge ravni klizanja, što dovodi do zatupljivanja prsline; ostvaren je priraštaj dužine prsline za  $\Delta a$ , čime je izazvana plastična deformacija ograničena na malo područje, okružena elastičnom deformacijom,
- **faza 5 (e)** - kada se opterećenje u ciklusu smanjuje, zbog elastične deformacije koja se vraća, dolazi do pritiska u području plastične deformacije zbog očuvanja kompatibilnosti deformacije; dolazi do prekoračenja granice popuštanja pri

pritisku i ponovne pojave plastične deformacije, kojom se zatvara i zaoštrava vrh zatupljene prsline i

- **faza 6 i 7 (e do g)** - ponavljanje procesa.

Proces napredovanja zamorne prsline u ciklusu se iskazuje malom brazdom na površini preloma, koja prati čelo prsline (strija) [73, 79, 80], sl. 2.10a,b,c.



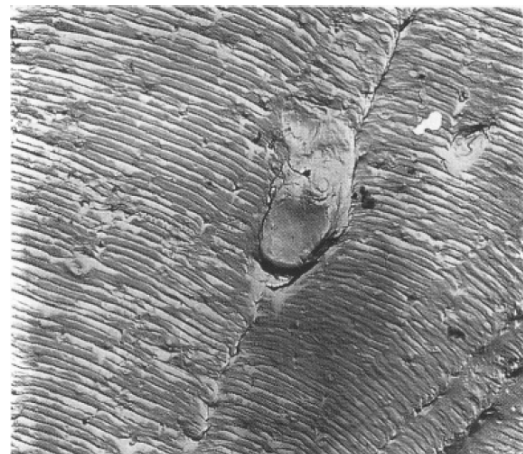
a) Površina preloma nosača užeta bagera [79]



b) Prolazna prsline turbinskog vratila [80]



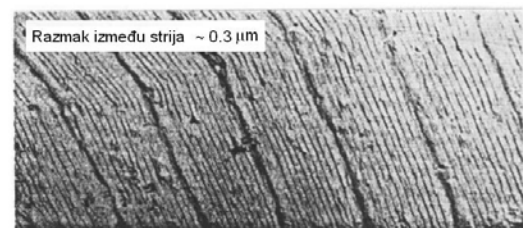
c) Površina preloma turbinskih lopatica [73]



d) Uključak koji remeti raspored strija [73]



e) Zone loma turbinskog vratila [80]



f) Zavisnost između strija i cikličnog opterećenja tokom rasta makroprsline [73]

Slika 2.10. Površine lomova sa strijama kao pokazateljem napredovanja zamorne prsline

Površina preloma nam govori o karakteru i kombinaciji zamora kao i uticajima sredine na brzinu napredovanja prsline (kombinacija opterećenja visoko i niskocikličnog sa uticajem visoke temperature i/ili korozione sredine [73, 80]), sl. 2.10b,c,e.

Do napredovanja prsline može doći i cepanjem, gde se kao rezultat na površini preloma dobijaju strije krtoq loma, različite od onih pri opisanom procesu. Zamorne strije predstavljaju uzastopne položaje čela prsline pri njenom napredovanju. Svaka strija odgovara jednom ciklusu a veličina razmaka strija zavisi od veličine napona u ciklusu, što za date uslove opterećenja predstavlja meru brzine napredovanja prsline u ciklusu, sl. 2.10f. U nekim slučajevima veličina strija se može pratiti na elektronskom mikroskopu, a to se može iskoristiti kao podatak o brzini napredovanja zamorne prsline pri lomu u eksploataciji ili ispitivanju.

Obrazovanje ravnomernih strija je uslovljeno: postojanjem pogodnog sistema linija klizanja, da bi se zakrivljeno čelo prsline kretalo kroz njega, i mogućnošću kontinualnog napredovanja prsline kroz naredna susedna zrna, kao i postojanjem više od jedne kristalografske ravni za napredovanje prsline.

Ako su ovi uslovi ispunjeni doći će do klizanja tokom otvaranja i zatvaranja prsline, prilagođenom uslovima na vrhu prsline, pa će strije biti jasno uočljive. Ako ovi uslovi nisu ispunjeni, klizanje će biti neravnomerno, pa se strije neće ravnomerno obrazovati. Orjentacija nekih zrna može pogodovati obrazovanju ravnomernih strija, ali zbog ometanog klizanja duž dela čela prsline u susednim zrnima druge orjentacije one neće biti izražene: Tada se strije mogu samo delimično pratiti na površini preloma. Ako je, pak, mogućnost deformisanja zrna potpuno isključena, strije se uopšte neće pojaviti. Kada su deformacije ograničene na granice zrna zamorni lom može biti interkristalan.

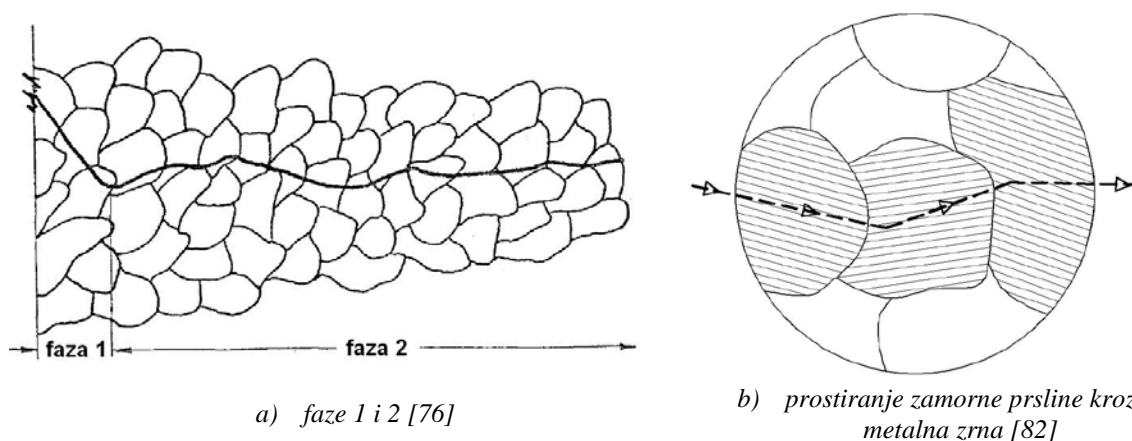
Uključci i čestice faze 2 na glatkoj epruveti su mesta koncentracije napona, pa se na tim mestima može pojaviti plastična deformacija, sl. 2.8. Ovaj uticaj gubi na značaju ako postoji geometrijska koncentracija napona.

Iz istog razloga uključci i čestice faze 2 imaju samo neznatan uticaj na napredovanje zamorne prsline, čak i kada su u pitanju veće čestice, koje tada samo lokalno remete raspored strija, sl. 2.10d.

Situacija je drugačija pri velikim brzinama napredovanja prsline, najmanje 1 mm po ciklusu. Velika brzina je posledica velikog intenziteta napona na vrhu prsline zbog

velike prsline, ili velikog opterećenja. Pri tom čestice, koje se nađu na putu prsline, se cepaju ili odvajaju od matrice, pa se na tom mestu stvara šupljina. Materijal između vrha prsline i šupljine se lomi čupanjem, što stvara skok na čelu prsline. Kako je uticaj čestica izražen samo pri velikim brzinama napredovanja prsline, on je od značaja samo u poslednjoj fazi zamornog loma, koja je mala u ukupnom lomu.

Zamorne prsline se iniciraju po lokalnim trakama klizanja i imaju početnu tendenciju napredovanja u ravni maksimalnog napona smicanja [81]. Takvo napredovanje je veoma malo, reda veličine nekoliko zrna, sl. 2.11a.



Slika 2.11. Transkristalno napredovanje zamorne prsline

Proces zamora se može objasniti i na sledeći način [83,84]:

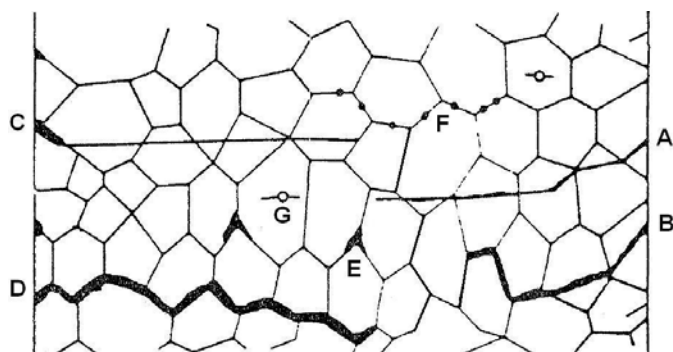
- klizanje materijala, praćeno nastankom finih prsline, koje su vidljive pri velikom uvećanju a daljim razvojem se mogu videti i golim okom,
- spajanje prsline i dalje napredovanje najvećih prsline do kritične veličine, posle čega nastupa lom.

Opisani proces je brži ako je napon veći. Pri tome prsline se mogu zaustaviti u polju zaostalih napona.

Analogno prethodnom, zamor se sastoji od stvaranja, inicijacije, prsline, njenog napredovanja i konačnog loma. Važno je napomenuti da u realnim zavarenim konstrukcijama postoje vidljive prsline kada se stvaranje svodi samo na početak napredovanja postojeće prsline. Odatle sledi da je za konstrukciju važna faza u kojoj prsline napreduje, pa je zadatak sprečiti ili kontrolisati napredovanje zamorne prsline.

Na slici 2.12 shematski su prikazane vrste prsline usled niskocikličnog zamora [74]. Mesto inicijacije prsline može biti: **na površini komada i u uputrašnjosti**

komada. Prsline inicirane na površini komada dalje se mogu širiti: **interkristalno i transkristalno**.



Oznake:

A - transkristalna inicijacija i transkristalni rast prsline,  
 B - transkristalna inicijacija i interkristalni rast prsline,  
 C - interkristalna inicijacija i transkristalni rast prsline,  
 D - interkristalna inicijacija i interkristalni rast prsline,  
 E - inicijacija prsline u trojnoj tački,  
 F - kavitacija na granicama zrna i  
 G - inicijacija prsline na mestima praznina ili uključaka u matrici.

Slika 2.12. Šematski prikaz prsline u materijalu izloženom niskocikličnom zamoru [74]

Brzina širenja prsline inicirane na površini komada može biti: **nezavisna od frekvencije ciklusa** (ili od brzine deformacije), **zavisna od brzine deformacije**, što je određeno mehaničkim faktorima i **zavisna od vremena**, što je određeno okolnom sredinom (npr. korozija).

Za brzinu širenja prsline inicirane u unutrašnjosti komada vredi sve što je rečeno za brzinu širenja prsline inicirane na površini komada. Razlika je jedino u tome što na brzinu širenja unutrašnje prsline ne može delovati okolna sredina.

### 2.3.2. Niskociklični zamor materijala

Zamor je pojava postepenog razaranja materijala mašinskog dela izloženog delovanju promenljivog opterećenja [85, 86]. Akumulacija oštećenja u vidu obrazovanja i rasta mikropora predstavlja prvu fazu razaranja koja se završava kada se spajanjem mikropora obrazuju prsline. Širenje prsline koje se završava lomom predstavlja drugu fazu razaranja [26]. Prsline obrazovane pri broju ciklusa  $N < 10^4$  ( $10^5$ ) rezultat su niskocikličnog zamora [12, 87-93].

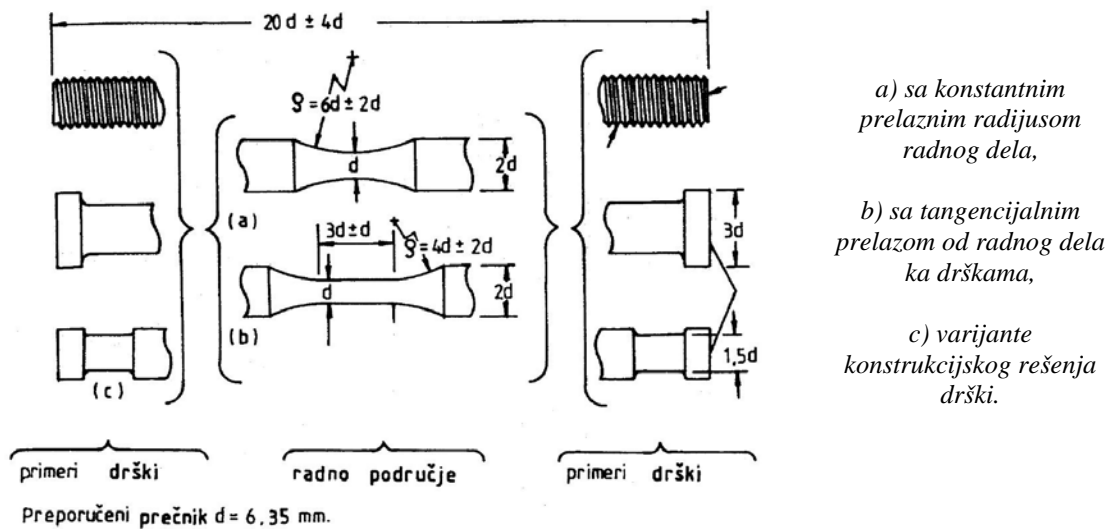
#### 2.3.2.1. Ispitivanje niskocikličnim zamorom

Podaci o ispitivanju zamaranjem glatkih epruveta su značajni za opštu ocenu otpornosti prema uticaju promenljivog opterećenja na nivou elastičnih napona, i tada se govori o tzv. visokocikličnom zamoru. Postupak za ispitivanje visokocikličnim zamorom propisan je standardom ASTM E468 [94].

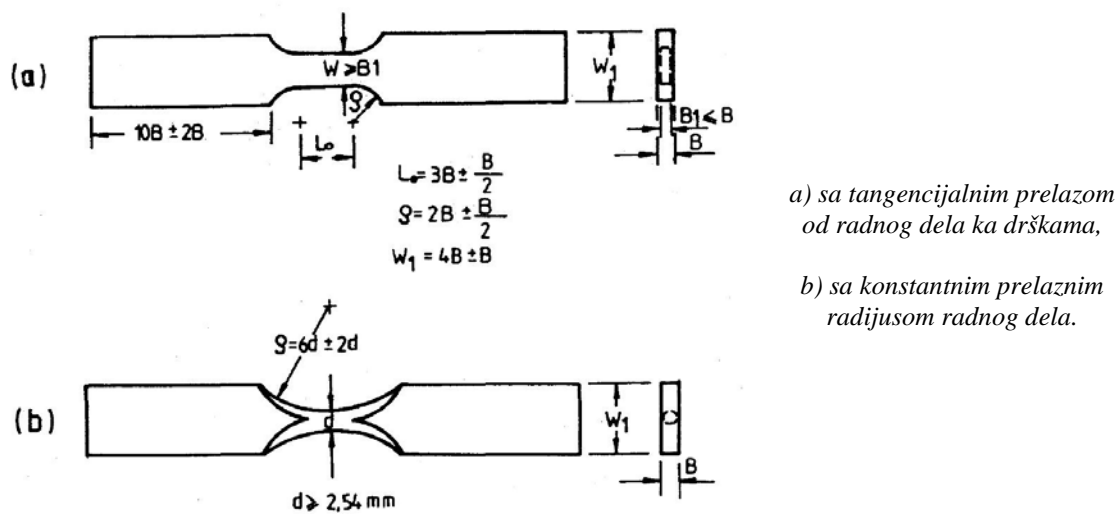
Česti su i važni slučajevi kada se pri promenljivom opterećenju prekoračuje granica tečenja, odnosno kada su deformacije neelastične. U tom slučaju do loma dolazi pri srazmerno malom broju promena opterećenja, te odatle potiče i naziv "niskociklični" ili "malo-ciklični" zamor. Postupak za ispitivanje nisko cikličnog zamora propisan je standardima ASTM E606 [95] i ISO 12106:2003(E) [96]. Kao i prethodno, i ovo ispitivanje se izvodi konstantnom amplitudom, sa okruglim epruvetama, sl. 2.13, i sa pljosnatim epruvetama, sl. 2.14.

Dok se kod visoko cikličnog zamora konstantna amplituda odnosi i kontroliše isključivo preko napona, odnosno opterećenja, u slučaju nisko cikličnog zamora procesom se po pravilu upravlja preko konstantne amplitude ukupne deformacije, koja obuhvata elastični i neelastični - plastični deo, ali se dopušta i korišćenje ciklusa konstantnog napona. Na taj način je lažke kontrolisati ukupnu veličinu ciklične plastične deformacije, najvažnijeg pokazatelja nisko cikličnog zamora, na osnovu koga je moguće formulisati empirijske zavisnosti ciklično promenljivog napona, ukupne deformacije, plastične deformacije i zamornog veka. Preporuke o ispitivanju upućuju na primenu okruglih epruveta prečnika većeg od 6,35 mm, sl. 2.13. Za manje dimenzije preporučuju

se pljosnate epruvete, sl. 2.14, a ako je materijal tanji od 2,45 mm, i amplituda deformacije veća od 1 %, pogodno je koristiti epruvetu sa sl. 2.14a.



Slika 2.13. Preporučene okrugle epruvete za ispitivanje nisko cikličnim zamorom [95]



Slika 2.14. Pljosnate epruvete za ispitivanje niskocikličnog zamora [95]

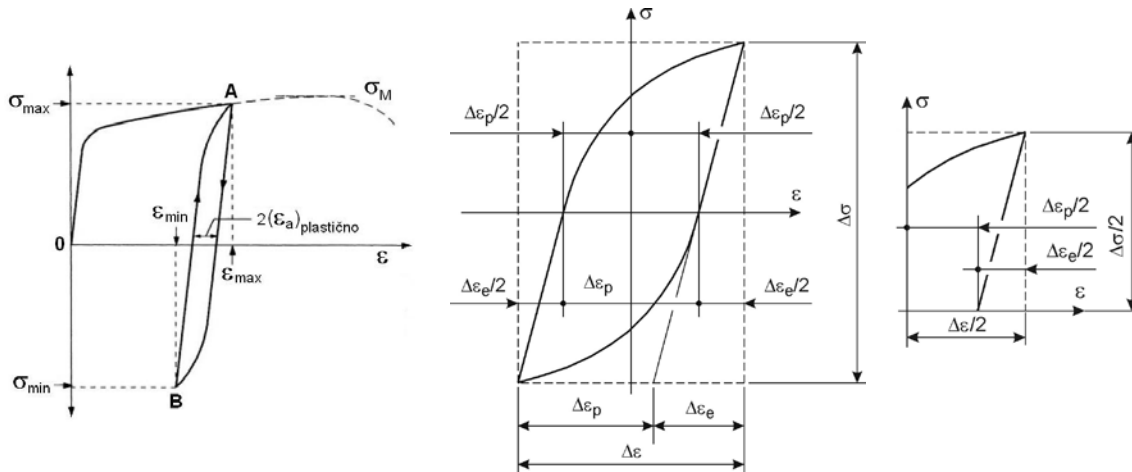
Uslovi ispitivanja nisu ograničeni u pogledu temperature, atmosfere, obrade površine materijala, uz zahtev da su, vremenski zavisne plastične deformacije, zanemarljive veličine u poređenju sa vremenski nezavisnim neelastičnim deformacijama. Zbog svega ovog, zahtevi koje mašine za ispitivanje nisko cikličnog zamora treba da ispune su strožiji od zahteva za visoko ciklični zamor. Osnovne veličine ispitivanja niskocikličnim zamorom definisane su standardom ASTM E513 [97].



### 2.3.2.2. Ponašanje materijala pri niskocikličnom zamoru

Ponašanje materijala pri niskocikličnom zamoru ispituje se eksperimentalno, u skladu sa standardom ASTM E 606-04 (američki) [95] i/ili ISO 12106:2003(E) (evropski) [96]. U tu svrhu koriste se glatke epruvete koje se na više nivoa regulisanih deformacija, sa faktorom asimetrije  $R_\epsilon = \epsilon_{\min}/\epsilon_{\max} = -1$ , na sobnim, povišenim ili sniženim temperaturama, izlažu niskocikličnom zamoru [85, 86].

Naponsko-deformacioni odziv pri niskocikličnom zamoru oblika je IDEALIZOVANE HISTEREZISNE PETLJE [73,85,86,89] prikazane na sl. 2.15. Raspon deformacija  $\Delta\epsilon$  odgovara ukupnoj širini petlje, a raspon napona  $\Delta\sigma$  odgovara njenoj ukupnoj visini. Amplituda napona jednaka je polurasponu napona.



*Naponsko deformaciona petlja ciklusa visoke amplitude napona nakon prve primene  $\sigma_{\max}$  [73]*

*Naponsko deformacioni odziv [85,86]*

*Pozitivni deo petlje*

Slika 2.15. Idealizovana histerezisna petlja

Raspon deformacija ili ukupna deformacija  $\Delta\epsilon$  jednaka je zbiru ukupne elastične,  $\Delta\epsilon_e$  i ukupne plastične deformacije,  $\Delta\epsilon_p$ .

Uvođenjem amplituda deformacija izraženih preko odgovarajućih poluraspona dolazi se do jednačine:

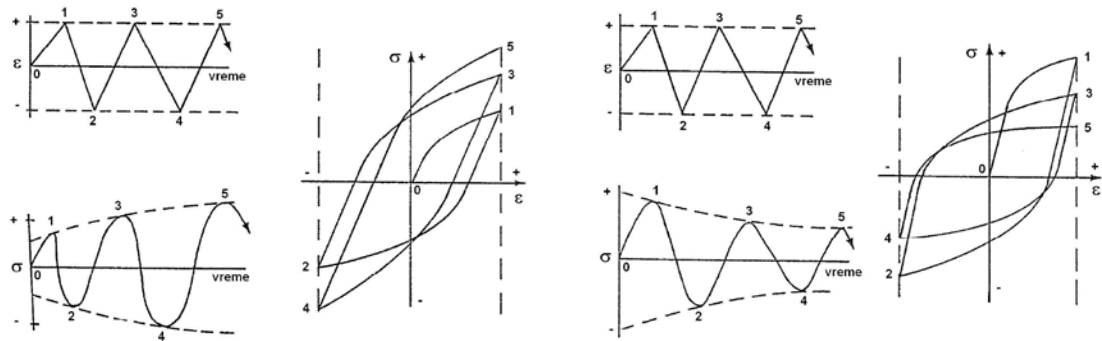
$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (2.2)$$

Materijali u uslovima niskocikličnog zamora mogu da:

- Ciklično ojačavaju,

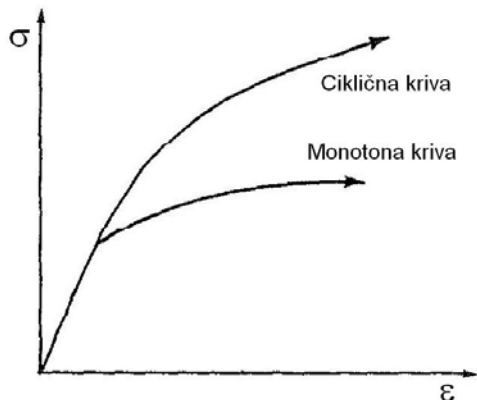
- Ciklično slabe,
- Da su ciklično stabilni i
- Ciklično ojačavaju i ciklično slabe u navedenom ili obrnutom redosledu.

Šematski prikaz cikličnog ponašanja materijala [89, 90, 92, 98, 99] dat je na sl. 2.16a,b, a na sl. 2.16c,d,e,f uporedni prikaz monotone i ciklične naponsko deformacione krive za različita ciklična ponašanja materijala.

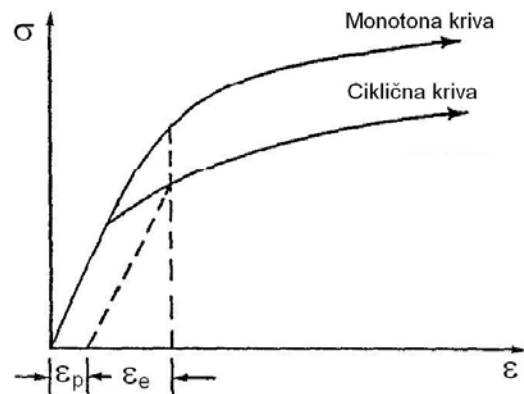


a) Ciklično ojačavanje materijala

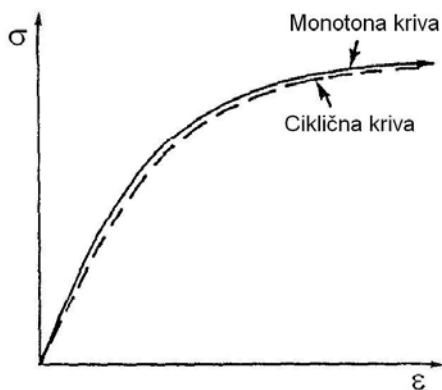
b) Ciklično slabljenje materijala



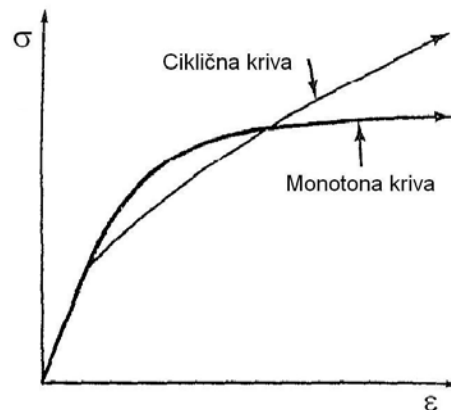
c) Naponsko deformacione krive kod cikličnog ojačavanja materijala



d) Naponsko deformacione krive kod cikličnog slabljenja materijala



e) Naponsko deformacione krive kod ciklično stabilnog ponašanja materijala



f) Naponsko deformacione krive kod ciklično mešovitog ponašanja materijala

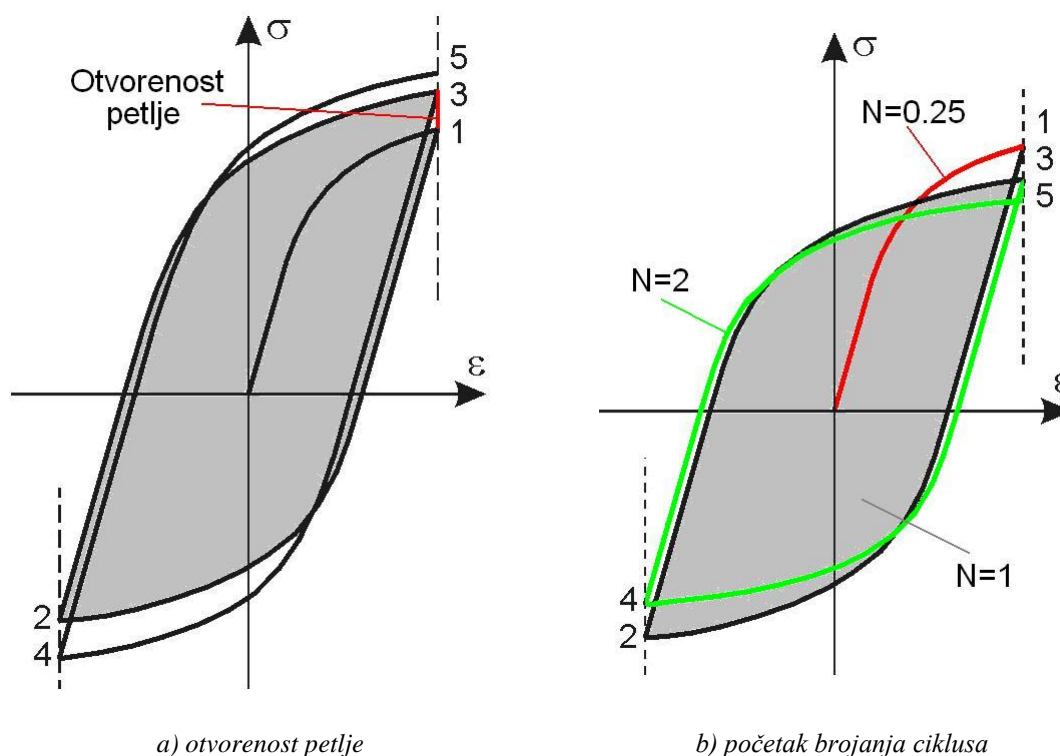
Slika 2.16. Šematski prikaz cikličnog ponašanja materijala [99]

U slučaju ispitivanja materijala koji su relativno neosetljivi na brzinu deformacije, uobičajeno je da se upotrebljava sinusni oblik talasa deformacija-vreme, a ne testerasi oblik, sl. 2.16a,b. Korišćenje sinusnog talasnog oblika za deformaciju dovodi do kontinuiranog variranja brzine deformacije u toku jednog ciklusa, što nije preporučljivo za materijale koji su veoma osetljivi na brzinu deformacije, kao što je, recimo, čisto železo. Kod takvih materijala se koristi testerasti (trougaoni) oblik talasa gde će brzina deformacije biti konstanta tokom jednog ciklusa. Štaviše, frekvencija talasa biće tako podešena da će brzina deformacije biti konstantna i u pratećim ispitivanjima pri različitim amplitudama deformacije. [100]

Pri izboru frekvencija za sinusni oblik talasa, uobičajeno je da se koriste rastuće frekvencije sa opadanjem amplitude deformacije. Ovakav pristup ima dve prednosti. Prvo, ispitivanja pri nižim amplitudama deformacije zahtevaju veći broj ciklusa do loma i stoga više frekvencije dozvoljavaju da se ispitivanja obave u razumno kratkom vremenu. Drugo, sa smanjenjem amplitude deformaciju i povećanjem frekvencije, tendencija je da se brzina deformacije održi približno konstantnom u oba slučaja ispitivanja veka-dugotrajnih i kratkotrajnih. Prema tome, kod materijala koji su neosetljivi na brzinu deformacije, izbor frekvencije je kompromis između dužine trajanja ispitivanja i ne prekomerne varijacije prosečne brzine deformacije. [100]

Teorijska analiza ponašanja materijala izloženih niskocikličnom zamoru zasnovana je na sledećim pretpostavkama [85, 86]:

- Otvorenost petlje histereze je mala i zanemaruje se, sl. 2.17,
- Plastične deformacije ne menjaju elastične konstante materijala,
- Deo ciklusa  $N = 0.25$  do tačke 1 na sl. 2.17 zanemaruje se,
- Promene srednjih vrednosti napona i deformacija su takođe male i zanemaruju se.



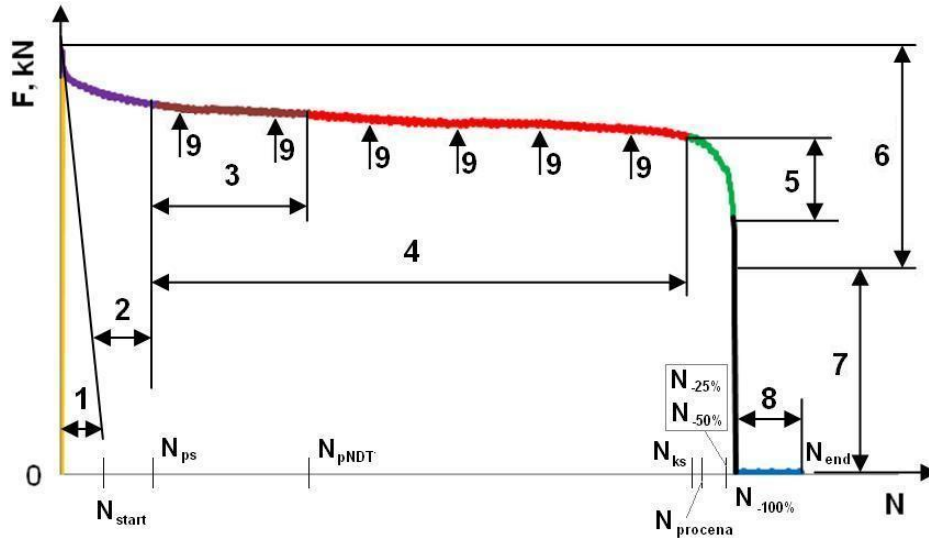
Slika 2.17. Pretpostavke o ponašanju materijala izloženih niskocikličnom zamoru

Većina materijala, pri niskocikličnom zamoru, na određenom nivou regulisane deformacije postiže takozvano stabilizovano stanje. To je stanje kada se visina histeretske petlje izražena preko raspona sile opterećenja ili napona neznatno menja, sl. 2.18.

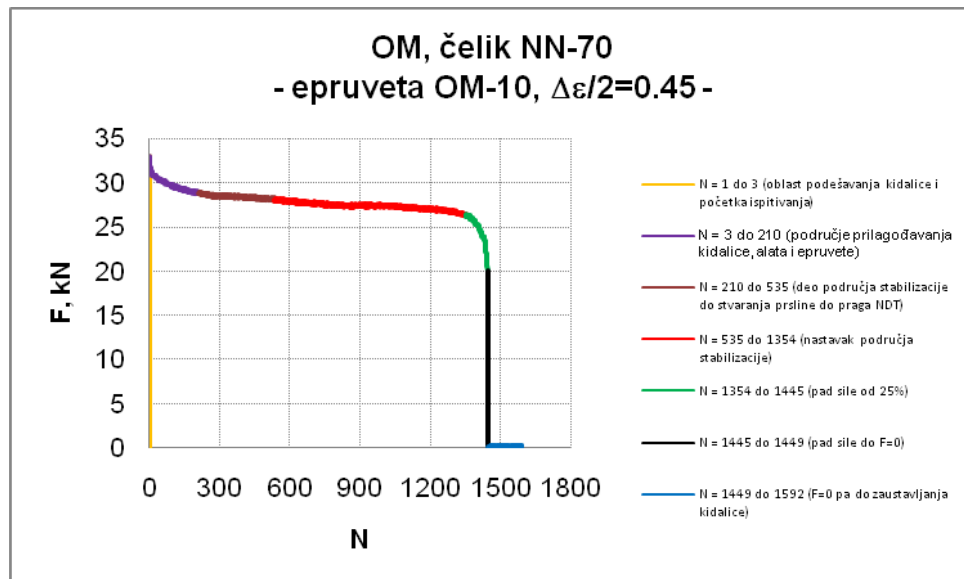
Histerezu za ciklus  $N_s$  u oblasti stabilizacije koji je blizak ili jednak polovini broja ciklusa do iniciranja prsline  $N_f$ , zovemo STABILIZOVANOM HISTEREZOM [12, 85, 86, 89, 90, 92]. Ona je predstavnik svih histereza i služi za opisivanje kompletnog procesa niskocikličnog zamora, odnosno, sa nje se vade svi potrebni podaci koji nam trebaju za određivanje karakterističnih krivih niskocikličnog zamora.

**Ranije se smatralo da se stabilizovana histereza uspostavlja pri polovini broja ciklusa do loma [65, 67, 101-103], a od devedesetih godina pri polovini broja ciklusa do pojave prsline [12, 68, 92, 104-112].**

Najčešće metode ili načini za određivanje broja ciklusa do iniciranja prsline,  $N_f$ , su definisani standardima [95, 96].



- 1 – Podešavanje kidalice; 2 – Prilagođavanje kidalice, alata i epruvete;  
 3 – Stvaranje prsline do praga NDT; 4 – Stabilizovano stanje;  
 5 – Pad sile od 25 % (ISO 12106:2003(E)); 6 – Pad sile od 50 % (ASTM E 606-04);  
 7 – Pad sile do  $F=0$ ; 8 – Zaustavljanje kidalice; 9 – Visina histerezisne petlje;  
 $N_{start}$  - početak ispitivanja,  $F=max$ ;  $N_{ps}$  - početak stabilizacije;  $N_{pNDT}$  - prag NDT;  $N_{ks}$  - kraj stabilizacije;  
 $N_{xx\%}$  - pad sile za  $xx\%$ ;  $N_{procena}$  - procena operatera za pad sile;  $N_{end}$  - kraj ispitivanja



Slika 2.18. Oblasti niskocikličnog zamora sa konkretnim primerom

### 2.3.2.3. Metode za određivanje stabilizovane histereze

Za određivanje stabilizovane histereze u ovom radu ćemo koristiti 4 metode, tab. 2.1:

1. iskustvenu (metodu operatera na kidalici),  $N_{procena}$ ,
2. preporuku standarda ISO 12106:2003(E),  $N_{.25\%}$ ,
3. preporuku standarda ASTM E 606-04<sup>e</sup>,  $N_{.50\%}$ ,
4. Novopredloženu: metodu praga IBR,  $N_{pNDT}$ .

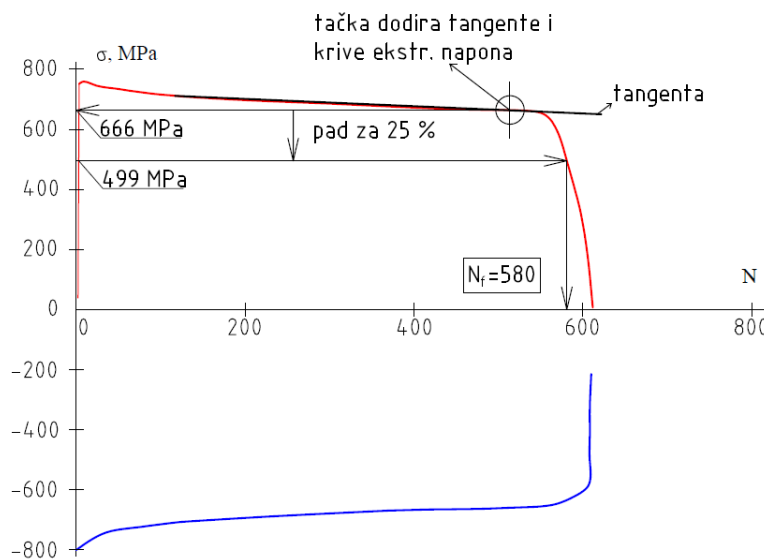
Tabela 2.1. Karakteristični stabilizovani ciklusi LCF osnovnog metala čelika NN-70

OM-09		$\Delta\epsilon/2=0.35$	Stabilizovane histereze za analizu			
	N	Opis	$N_{s1}=N$	$N_{s2}=N/2$	$N_{s3}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s4}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$
	1	početak podešavanja				
$N_{start}$	15	početak ispitivanja i prilagođavanja <b>F=max</b>				
$N_{ps}$	812	početak stabilizacije i stvaranja zamorne prsline	812			
$N_{pNDT}$	2527	<b>prag NDT</b> i nastavak stabilizacije	2527			1670
$N_{ks}$	6740	kraj stabilizacije i početak značajnog pada sile			3776	
$N_{.25\%}$	8329	pad sile od 25% (prema ISO 12106:2003(E))		4165		
$N_{.50\%}$	8422	pad sile od 50% (prema ASTM E 606-04)		4211		
$N_{.100\%}$	8425	pad sile do <b>F približno = 0</b>				
$N_{end}$	8429	završetak ispitivanja				
$N_{procena}$	7040	do procene pojave značajne prsline i početka pada sile (procena operatera na kidalici)		3520		

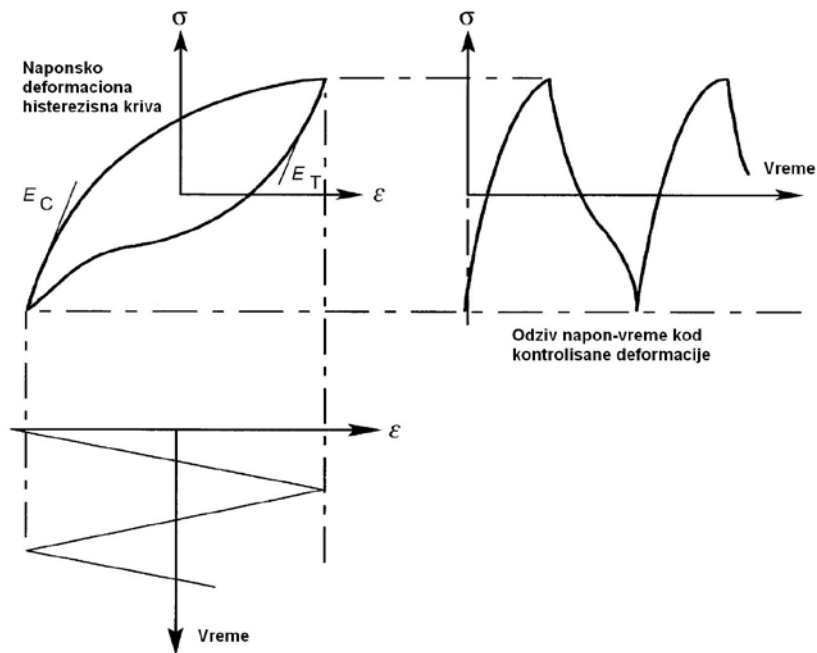
Karakteristične veličine ovih metoda su:

1.  $N_f = N_{procena}$  – je ciklus kada operater na kidalici proceni pojavu značajne prsline i početak pada sile;  $N_s = N_{procena}/2$  – stabilizovana histereza za analizu po iskustvenoj metodi.
2.  $N_f = N_{.25\%}$  – je ciklus kada sila padne za 25% u odnosu na ciklus koji određuje kraj stabilizacije i početak značajnog pada sile,  $N_{ks}$ ;  $N_s = N_{.25\%}/2$  – stabilizovana histereza za analizu po preporuci standarda ISO 12106:2003(E) [96], sl. 2.19 [82].
3.  $N_f = N_{.50\%}$  – je ciklus kada maksimalna sila padne za 50%;  $N_s = N_{.50\%}/2$  – stabilizovana histereza za analizu po preporuci standarda ASTM E 606-04<sup>e</sup> [95].  $N_f$  se može odrediti i metodom modula [95, 96], sl. 2.20.
4. Prslinu možemo identifikovati metodama NDT (IBR) (površinski MT, PT, a zapreminski/po dubini UT). Najmanja greška (prslina) koju identifikujemo ovim metodama predstavlja prag NDT. Iz praktičnih razloga, u ovom radu,  $N_f = \text{prag}$

$N_{DT} = N_{pNDT}$ , tj. ciklus pojave prsline je ciklus u kome je metodama NDT moguće identifikovati nastanak takve prsline, a u radu je usvojeno da to bude prsline površine  $1 \text{ mm}^2$ . Znači, ciklus, kada se poprečni presek epruvete zbog nastanka zamorne prsline smanji za  $1 \text{ mm}^2$ , nazivamo ciklusom pojave prsline,  $N_f$ . Razlika  $A_0 - A_n \geq \text{praga NDT}$ , sl. 2.21, predstavlja ciklus pri kome možemo identifikovati prslinu metodama NDT. Iz eksperimentalnih podataka, proračunom na osnovu formula, sl. 2.21, i filtriranjem podataka po površini poprečnog preseka koji zadovoljava datu razliku površina određujemo broj ciklusa,  $N_{pNDT}$ , pri kome dolazi do stvaranja prsline, a koju je moguće identifikovati metodama NDT i taj broj ciklusa možemo smatrati kao  $N_f$ , tj. broj ciklusa pri kome dolazi do iniciranja prsline. Stabilizovana histereza,  $N_s$ , se nalazi na polovini oblasti 3, sl. 2.18, i određuje se formulom,  $N_s = N_{ps} + (N_{pNDT} - N_{ps})/2$ , sl. 2.18 i tab. 2.1. Ovo je nova metoda određivanja stabilizovane histereze koju sam nazvao “metoda praga NDT (IBR)”.



Slika 2.19. Određivanje ciklusa  $N_f$  po preporuci standarda ISO 12106:2003(E), pri kome sila (napon) padne za 25% [82]



$E_C$  – modul elastičnosti pri naponu pritiska (compression stress)

$E_T$  – modul elastičnosti pri naponu zatezanju (tensile stress)

$N$  – broj ciklusa

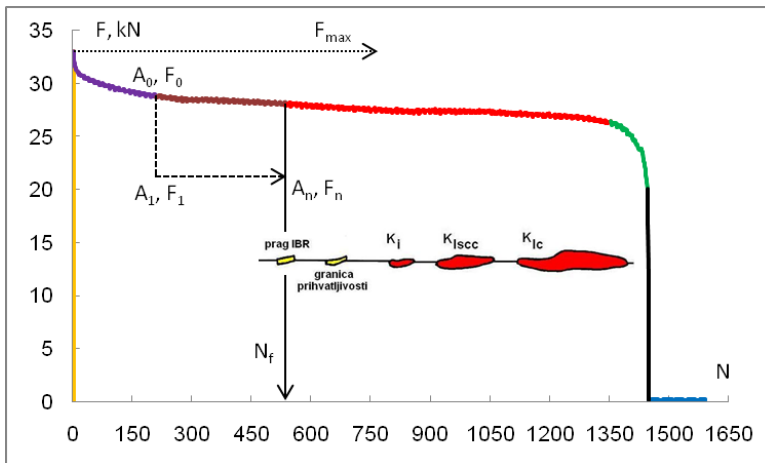
Lom (oštećenje) je definisano kada odnos:

$$Q_N = E_{NT}/E_{NC}$$

dostigne polovinu vrednosti  $Q$  za prvi ciklus.

$$Q_{Nf} = 0.5 Q_1$$

Slika 2.20. Određivanje ciklusa  $N_f$ , metodom modula elastičnosti [95, 96]



$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot F_{\max}}{D^2 \cdot \pi} \cdot 1000 \text{ [MPa]}$$

$F$  [kN],  $D$  [mm],  $A$  [mm<sup>2</sup>],  $\sigma$  [MPa]

$$\sigma_0 = \frac{F_0}{A_0} \text{ [MPa]},$$

$$A_0 = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \text{ [mm}^2\text{]},$$

$$A_1 = \frac{F_1}{\sigma_0},$$

$$A_n = \frac{F_n}{\sigma_{n-1}},$$

$$F_0 > F_1 > \dots > F_{n-1} > F_n$$

$$A_0 > A_1 > \dots > A_{n-1} > A_n$$

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_1}, \sigma_n = \frac{F_n}{A_n},$$

$$\sigma_0 > \sigma_1 > \dots > \sigma_{n-1} > \sigma_n$$

Slika 2.21. Određivanje ciklusa  $N_f$ , metodom praga NDT (IBR)



### 2.3.2.4. Određivanje modula elastičnosti iz ciklusa $N_{1/4}$

Modul elastičnosti, Youngov modul,  $E$ , može da se definiše kao odnos normalnog napona u poprečnom preseku epruvete i odgovarajućeg izduženja/skraćenja u području proporcionalnosti:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Modul elastičnosti se može izraziti i na sledeći način:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \equiv \operatorname{tg} \alpha \quad (2.4)$$

gde je:  $\alpha$  - ugao nagiba linearnog dela krive sa slike 2.24.

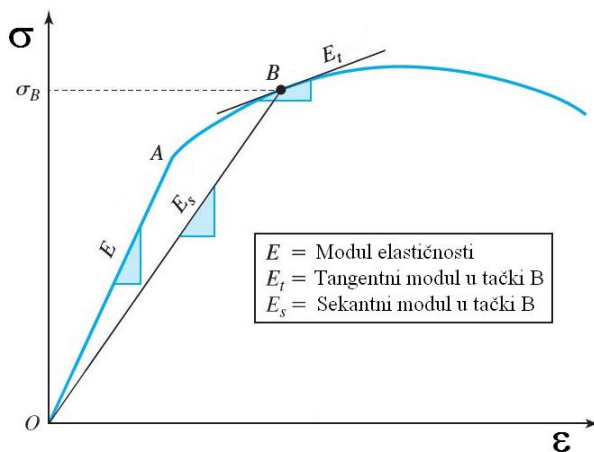
Metodologija određivanja modula elastičnosti zasniva se na Hukovom zakonu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

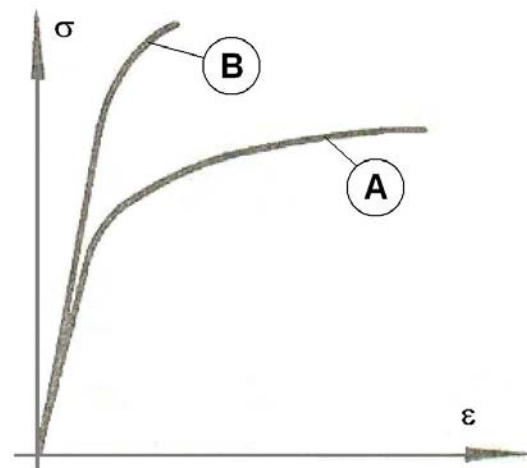
gde je:

- $\sigma$  - normalni napon,
- $E$  – modul elastičnosti i
- $\varepsilon$  - relativno izduženje.

Na dijagramu  $\sigma$ - $\varepsilon$ , sl. 2.22, možemo razlikovati tri modula [113, 114], od kojih modul elastičnosti predstavlja “uslovnu” konstantu i ima najširu primenu u opisu materijala. Konstanta je uslovljena brzinom opterećenja, sl. 2.23 [115].



Slika 2.22. Vrste modula za opis materijala na dijagramu  $\sigma$ - $\varepsilon$



A - statičko (sporo) opterećenje materijala;  
B - dinamičko (brzo) opterećenje materijala  
Slika 2.23. Uticaj brzine opterećenja na izgled dijagrama  $\sigma$ - $\varepsilon$

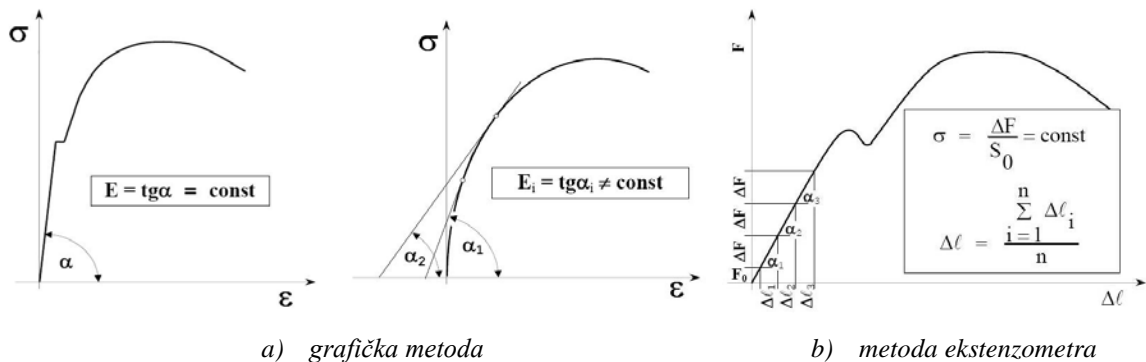
Porastom brzine opterećenja povećava se granica razvlačenja i zatezna čvrstoća, a opadaju vrednosti za izduženje i kontrakciju, sl. 2.23. Sa povećanjem brzine opterećenja menja se i izgled preloma od plastičnog do krtoğ.

Kao što se vidi sa slike 2.23, smanjenjem brzine nanošenja opterećenja (povećanjem vremena opterećenja uzorka do loma) dijagram  $\sigma$ - $\varepsilon$  menja oblik, tj. čvrstoća materijala i modul elastičnosti opadaju, uz porast deformacija pri lomu. [115]

Porast brzine opterećenja pri ispitivanju zatezne jačine metala i legura propisan je standardom [116] i treba da iznosi  $1 \text{ kp/mm}^2$  ( $0.01 \text{ kN/mm}^2 = 10 \text{ MPa}$ ) u sekundi. [117, 118]

Vrednost modula elastičnosti predstavlja svojstvo materijala i može se odrediti:

- grafičkom metodom, sl. 2.24a [119],
- metodom ekstenzometra, sl. 2.24b [119] i
- analitički iz podataka o zateznom ispitivanju ili ispitivanju NCZ iz ciklusa  $N_{1/4}$ , sl. 2.34.



Slika 2.24. Metodologija određivanja modula elastičnosti

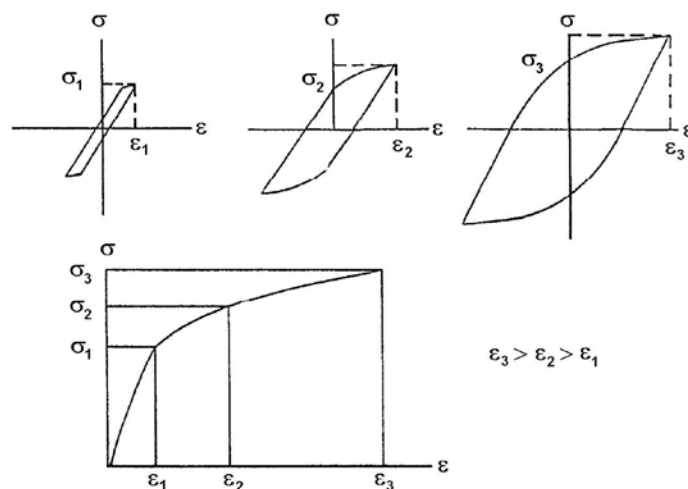
Izraz 2.5, u matematičkom smislu, predstavlja jednačinu prave (eksplicitna jednačina prave je  $y = m \cdot x$ ) u kojoj je modul elastičnosti koeficijent pravca,  $m$ , linearnog dela krive, sl. 2.22, 2.24 i 2.34, što omogućava njegovo lako određenje iz eksperimentalnih podataka ciklusa  $N_{1/4}$  u programu EXCEL.

### 2.3.3. Karakteristične krive niskocikličnog zamora

Krajnji cilj ispitivanja NCZ je konstruisanje karakterističnih krivih niskocikličnog zamora, koje se koriste u proračunima zamorne čvrstoće. U cilju definisanja i opisivanja procesa NCZ potrebno je odrediti: linearizovanu stepenu funkciju amplituda napona - amplituda plastične deformacije, ciklično naponsko - deformacionu krivu i elastičnu i plastičnu komponentu krive deformacija - vek i na kraju krivu deformacija - vek.

#### 2.3.3.1. Ciklična naponsko-deformaciona i kriva stabilizovanih histereza

CIKLIČNA NAPONSKO-DEFORMACIONA kriva predstavlja zavisnost amplitude napona  $\Delta\sigma/2$  od amplitude ukupne deformacije  $\Delta\varepsilon/2$ , sl. 2.40. Za definisanje ove krive koriste se eksperimentalno određene stabilizovane histereze više nivoa regulisanih deformacija, sl. 2.25.



Slika 2.25. Konstruisanje ciklične naponsko deformacione krive pomoću stabilizovanih histereza [99]

Amplituda ukupne deformacije  $\Delta\varepsilon/2$  (2.2) jednaka je zbiru elastične  $\Delta\varepsilon_e/2$  i plastične komponente  $\Delta\varepsilon_p/2$  (2.2), sl. 2.15. Elastična komponenta se primenom Hookeovog zakona može izraziti u obliku:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} \quad (2.6)$$

gde je E modul elastičnosti.

Veza između amplitude napona  $\Delta\sigma/2$  i amplitude plastične deformacije  $\Delta\varepsilon_p/2$  definisana je STEPENOM FUNKCIJOM [89, 90, 98]:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K' \left( \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (2.7)$$

iz koje se inverzijom dobija izraz:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.8)$$

gde su:

- $K'$  - Koeficijent ciklične čvrstoće i
- $n'$  - Eksponent cikličnog deformacionog ojačavanja.

Sabiranjem izraza (2.6) i (2.8) kao u (2.2), dobija se jednačina CIKLIČNE NAPONSKO-DEFORMACIONE KRIVE [85, 86, 89, 90, 98, 120]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.9)$$

Stepena funkcija amplituda napona - amplituda plastične deformacije (2.7), u log - log koordinatnom sistemu se linearizuje, odnosno transformiše u jednačinu prave:

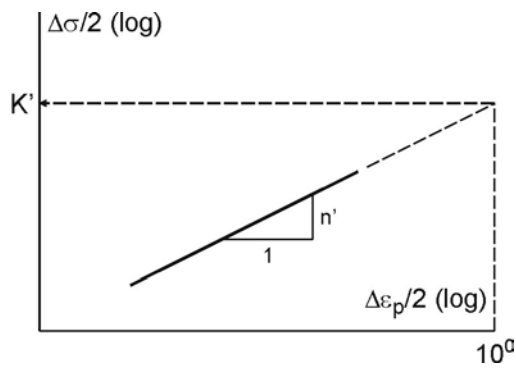
$$\log \frac{\Delta\sigma}{2} = n' \log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \log K' \quad (2.10)$$

u čijem se eksperimentalno određenom obliku, sl. 2.26, uočava vrednost eksponenta cikličnog deformacionog ojačavanja  $n'$  dok se do koeficijenta ciklične čvrstoće  $K'$  dolazi inverzijom [85, 86].

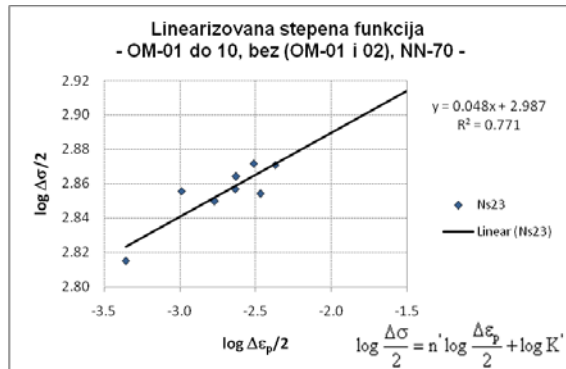
Linearizovana stepena funkcija amplituda napona – amplituda plastične deformacije sa ilustrovanim značenjem eksponenta  $n'$  i koeficijenta  $K'$ , prikazana je na sl. 2.26.

Prema približno tačnoj hipotezi Masing-a [89, 121], množenjem sa 2 obeju strana ciklične naponsko-deformacione krive (2.9) dobija se jednačina KRIVE STABILIZOVANIH HISTEREZA (Masing-ove krive) u  $\Delta\varepsilon$ – $\Delta\sigma$  sistemu:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.11)$$



Ilustracija [88, 89]

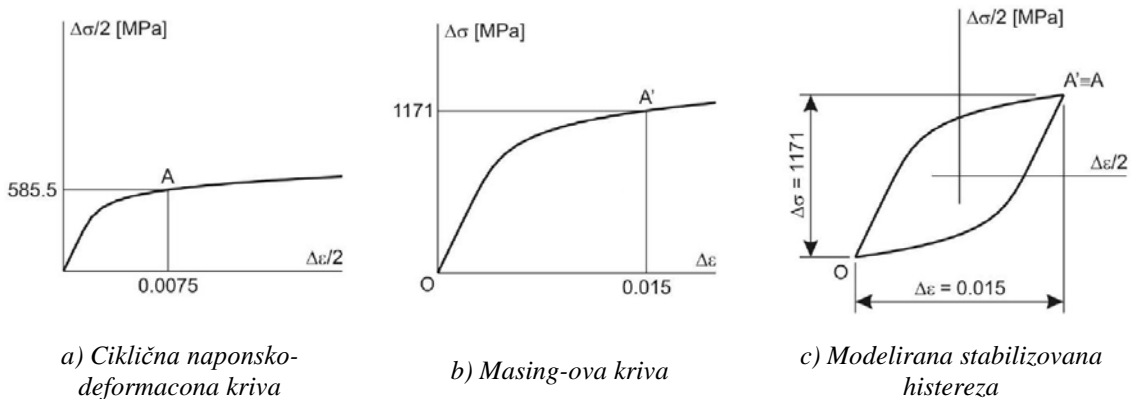


Eksponent  $n' = 0.048$  i  
koeficijent  $\log K' = 2.987$   
ciklično naponsko deformacione krive

Slika 2.26. Linearizovana stepena funkcije amplitude napon – plastične deformacije

Sa ovom krivom moguće je modelirati grane stabilizovanih histereza kojima se definiše naponsko-deformacioni odziv u kritičnoj tački konkretnog mašinskog dela izloženog niskocikličnom zamoru. Ovo ima opravdanja iz tog razloga što će se po ovom približnom postupku obrađivati histereze i radnih i kritičnih stanja što neće bitno uticati na ocenu radne sposobnosti.

Kao ilustracija, na sl. 2.27 prikazane su: CIKLIČNA NAPONSKO-DEFORMACIONA KRIVA, MASING-OVA KRIVA i jedan primer modelirane STABILIZOVANE HISTEREZE za slučaj izlaganja materijala simetričnom zatezanju i pritisku. Modeliranje stabilizovane histereze izvršeno je odvstručavanjem koordinata tačke A na cikličnoj naponsko-deformacionoj krivoj i na taj način dobijena dgovarajuća tačka A' na Masing-ovoj krivoj. Deo Masing-ove krive OA' identičan je granama stabilizovane histereze.



a) Ciklična naponsko-deformaciona kriva

b) Masing-ova kriva

c) Modelirana stabilizovana histereza

Slika 4.27. Primer modeliranja stabilizovane histereze [86]

### 2.3.3.2. Osnovna kriva i modifikovane krive niskocikličnog zamora

OSNOVNA KRIVA NISKOCIKLIČNOG ZAMORA predstavlja zavisnost amplitude ukupne deformacije  $\Delta\varepsilon/2$  od broja ciklusa do iniciranja prsline  $N_f$ , pa se može napisati [85] da je:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \varphi(N_f) \quad (2.12)$$

Podlogu za definisanje osnovne krive niskocikličnog zamora, kao i u slučaju ciklične naponsko-deformacione krive, čine EKSPERIMENTALNO ODREĐENE STABILIZOVANE HISTEREZE.

Elastična i plastična komponenta ukupne amplitudne deformacije takođe zavise od broja ciklusa do iniciranja prsline:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \varphi_1(N_f) \quad \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varphi_2(N_f) \quad (2.13)$$

Basquin je 1910. godine [89] uočio da se u oblasti vremenski ograničene izdržljivosti klasična WÖHLER-OVA KRIVA u log - log koordinatnom sistemu može linearizovati pomoću izraza:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f N_f^b \quad (2.14)$$

koji je kasnije nazvan Basquin-ova jednačina u kojoj su:

$\Delta\sigma/2$  - amplituda napona pri čistom naizmjenično promenljivom opterećenju,

$\sigma'_f$  - koeficijent zamorne čvrstoće,

$N_f$  - broj ciklusa do iniciranja prsline,

$b$  - eksponent zamorne čvrstoće, Basquin-ov eksponent.

Ako se (2.14) unese u (2.6), dobiće se:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b \quad (2.15)$$

što predstavlja konačan oblik zavisnosti  $\Delta\varepsilon_e/2 = \varphi_1(N_f)$  u (2.13).

Manson i Coffin su radeći nezavisno, pedesetih godina prošlog veka predložili EMPIRIJSKU FUNKCIJU U STEPENOM OBLIKU [89, 90, 98]:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f N_f^c \quad (2.16)$$

Ova funkcija je poznata kao Manson-Coffin-ova jednačina i predstavlja konačan oblik zavisnosti  $\Delta\varepsilon_p/2 = \varphi_2(N_f)$  u (2.13). U njoj se pored poznatih veličina, nalaze:

- $\varepsilon'_f$  - koeficijent zamorne duktilnosti i
- $c$  – eksponent zamorne duktilnosti.

Ako se izvrši sabiranje (2.15) i (2.16) dobićemo jednačinu OSNOVNE KRIVE NISKOCIKLIČNOG ZAMORA [89, 90, 98, 120]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c \quad (2.17)$$

kojom je predstavljen konačan oblik zavisnosti  $\Delta\varepsilon/2 = \varphi(N_f)$  u (2.12).

Elastična (2.15) i plastična komponenta (2.16) ukupne amplitudne deformacije, u log - log koordinatnim sistemima se linearizuju, odnosno transformišu u jednačine pravih:

$$\log \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma'_f}{E} \quad (2.18)$$

$$\log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \varepsilon'_f \quad (2.19)$$

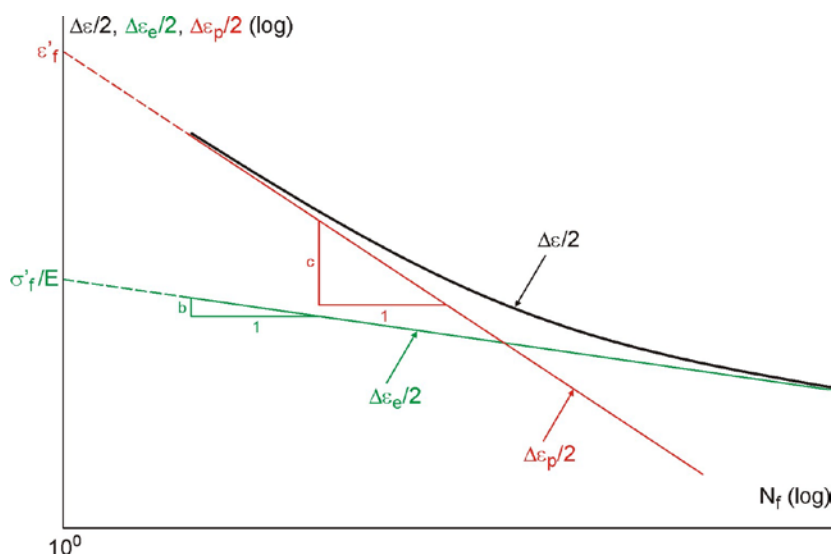
iz čijih se eksperimentalno određenih oblika određuju nepoznati koeficijenti i eksponenti potrebni za definisanje jednačine OSNOVNE KRIVE NISKOCIKLIČNOG ZAMORA, sl. 2.40.

Na sl. 2.40 i 2.28 predstavljena je osnovna kriva niskocikličnog zamora sa delovima koji se odnose na elastičnu,  $\Delta\varepsilon_e/2$ , i plastičnu,  $\Delta\varepsilon_p/2$ , komponentu. Slika 2.28 ilustruje i značenje eksponenta i koeficijenta potrebnih za definisanje osnovne krive niskocikličnog zamora (2.17).

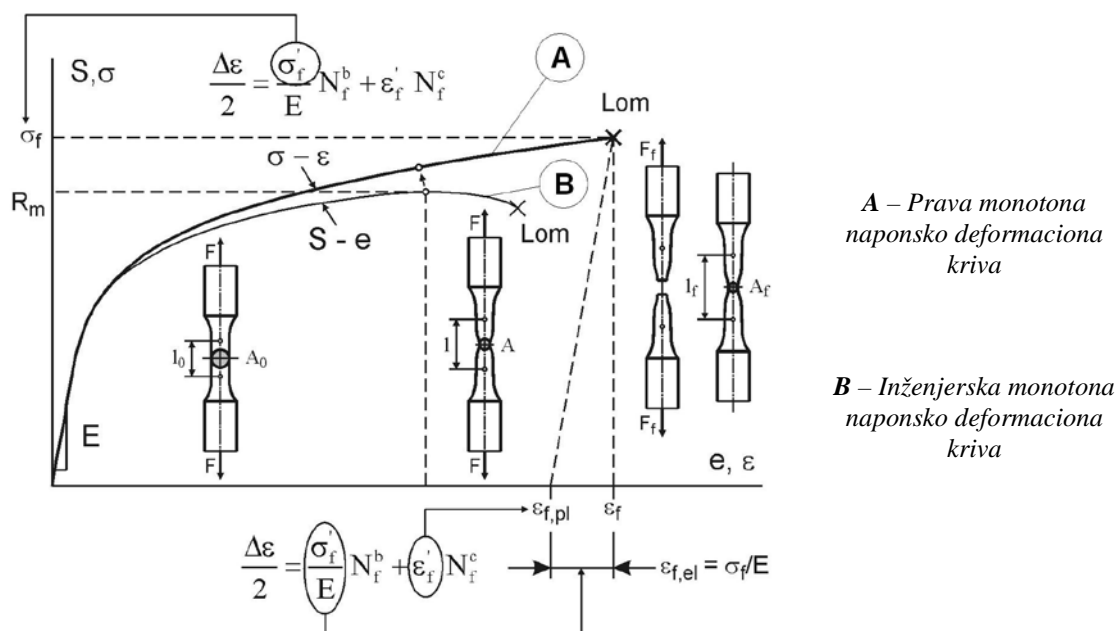
Koeficijenti zamorne čvrstoće i zamorne duktilnosti  $\sigma'_f$  i  $\varepsilon'_f$  u (2.17) koji se mogu odrediti pomoću eksperimentalno dobijenih jednačina (2.18) i (2.19), za  $N_{1/4}$ , približno su jednaki pravom naponu loma  $\sigma_f$  i pravoj plastičnoj deformaciji loma  $\varepsilon_{f,pl}$  [12, 92], sl. 2.29.

Koeficijent zamorne duktilnosti  $\varepsilon'_f$  izjednačava se približno sa pravom deformacijom loma  $\varepsilon_f$  što se može opravdati činjenicom da je prava elastična deformacija loma  $\varepsilon_{f,el} = \sigma_f/E$  kod duktilnih materijala zanemarivo mala u odnosu na deformaciju  $\varepsilon_f = \ln(A_0/A_f)$  [89]. Pravi naponi i prave deformacije opisuju PRAVU MONOTONU NAPONSKO-DEFORMACIONU KRIVU  $\sigma$ - $\varepsilon$  koja je na sl. 2.29

šematski upoređena sa INŽENJERSKOM MONOTONOM NAPONSKO-DEFORMACIONOM KRIVOM S-e ( $S = F/A_0$ ).



Slika 2.28. Eksponenti i koeficijenti na osnovnoj krivoj niskocikličnog zamora [86]



Slika 2.29. Značenje koeficijenata zamorne čvrstoće i zamorne duktilnosti [86]

U praktičnim proračunima radnog veka delova izloženih niskocikličnom zamoru koriste se MODIFIKOVANE KRIVE NISKOCIKLIČNOG ZAMORA kojima se uzima u obzir uticaj srednjih napona. Najpoznatije su: Morrow-ova, Manson-Hallford-ova i Smith-Watson-Topper-ova kriva niskocikličnog zamora.

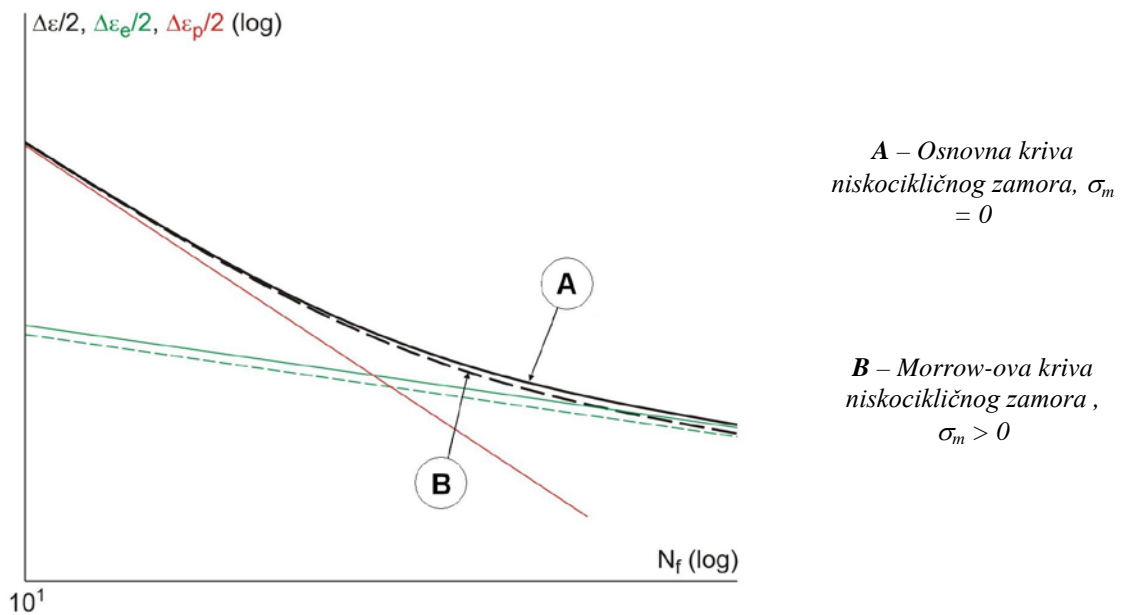


### 2.3.3.2.1. Morrow-ova kriva

Jednačina Morrow-ove krive niskocikličnog zamora [89, 122-124] je:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c \quad (2.20)$$

Razlika između ove krive i osnovne krive niskocikličnog zamora je u tome što se uzimajući u obzir srednji napon  $\sigma_m$ , modifikuje samo elastična komponenta ukupne amplitudne deformacije. Morrow-ova kriva niskocikličnog zamora za slučaj pozitivnog srednjeg napona, upoređena sa osnovnom krivom niskocikličnog zamora prikazana je na sl. 2.30.



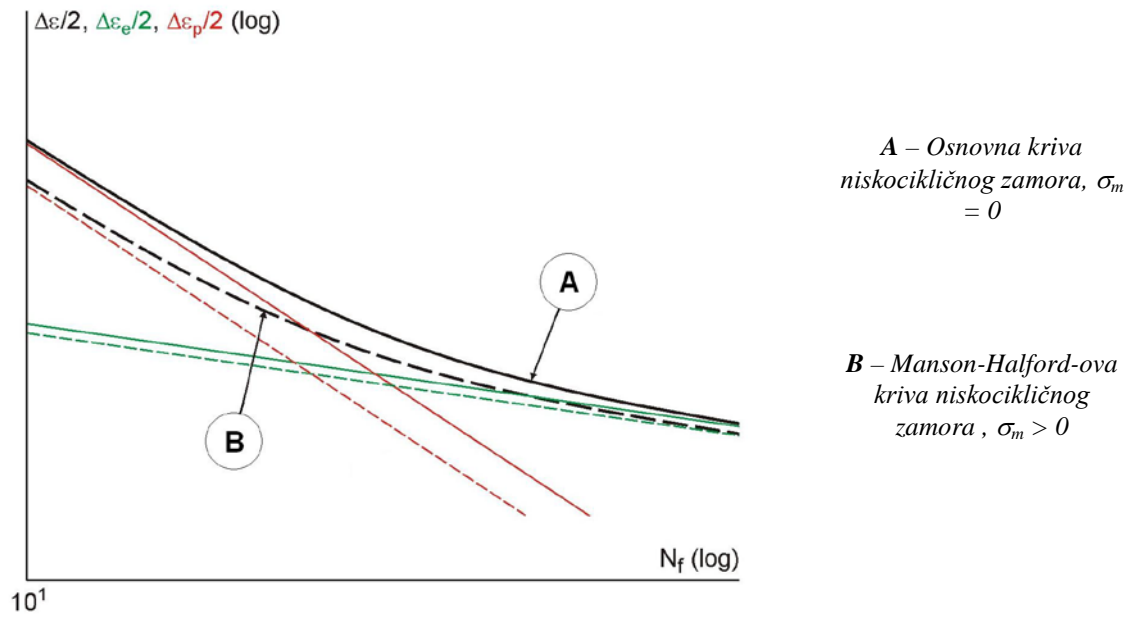
Slika 2.30. Poređenje Morrow-ove i osnovne krive niskocikličnog zamora [86]

### 2.3.3.2.2. Manson-Halford-ova

U jednačini Manson-Halford-ove krive niskocikličnog zamora [89, 123-125]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} N_f^b + \left( \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{\sigma_f'} \right)^c \varepsilon_f' N_f^c \quad (2.21)$$

modifikovane su obe komponente ukupne amplitudne deformacije, sl. 2.31.



Slika 2.31. Poređenje Manson-Halford-ove i krive niskocikličnog zamora [86]

### 2.3.3.2.3. Smith-Watson-Topper-ova kriva

U jednačini Smith-Watson-Topper-ove krive niskocikličnog zamora [12, 86, 89, 120, 123, 126]:

$$P_{\text{SWT}} = \sqrt{\sigma_{\text{max}} \frac{\Delta \varepsilon}{2} E} = \sqrt{(\sigma'_f)^2 (N_f)^{2b} + E \sigma'_f \varepsilon'_f (N_f)^{b+c}} \quad (2.22)$$

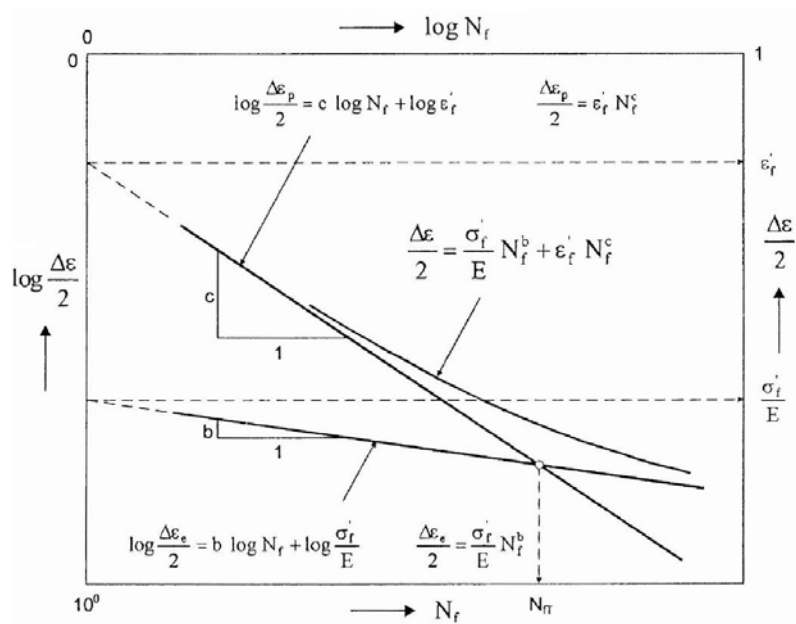
uticaj srednjih napona uzima se u obzir preko:

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_m + \frac{\Delta \sigma}{2} \quad (2.23)$$

Oznaka  $P_{\text{SWT}}$  u jednačini 2.22 odnosi se na Smith-Watson-Topper-ov parametar predstavljen kao geometrijsku sredinu maksimalnog  $\sigma_{\text{max}}$  i stvarnog idealno elastičnog napona ( $\Delta \varepsilon / 2 \cdot E$ ). U literaturi [86], zajedno sa Morrow-ovom i Manson-Halford-ovom krivom, obrađena je i primena Smith-Watson-Topper-ove krive niskocikličnog zamora.

### 2.3.4. Predviđanje veka konstrukcija izloženih niskocikličnom zamoru

Pomoću osnovne krive niskocikličnog zamora, poznate i kao kriva deformacija – vek, sl. 2.28, 2.30 i 2.31, koja predstavlja zavisnost amplitude ukupne deformacije,  $\Delta\varepsilon/2$ , od broja ciklusa do iniciranja prsline,  $N_f$ , može se tačno odrediti udeo plastične i elastične komponente materijala pri dejstvu niskocikličnog promenljivog opterećenja, sl. 2.32.



Slika 2.32. Kriva deformacija vek – određivanje prelaznog veka konstrukcije [85]

Na sl. 2.32 prikazane su deformacijske zavisnosti u zamornom veku gde je uočljivo da je kriva deformacija - vek asimptota plastičnoj krivoj za velike opsege deformacija u ciklusu, a asimptota elastičnoj krivoj za male opsege deformacija u ciklusu.

Presek krivih elastične i plastične komponente, sl. 2.32, označava prelaznu tačku odnosno prelazni vek,  $N_{FT}$ , koji se dobija izjednačavanjem elastične i plastične komponente osnovne krive niskocikličnog zamora:

$$\frac{\sigma_f'}{E} \cdot N_f^b = \varepsilon_f' \cdot N_f^c \quad (2.24)$$

Odakle dobijamo izraz za prelazni vek [85, 127, 128]:

$$N_{FT} = \left( \frac{\varepsilon_f' \cdot E}{\sigma_f'} \right)^{\frac{1}{b-c}} \quad (2.25)$$

### 2.3.5. Analiza rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom

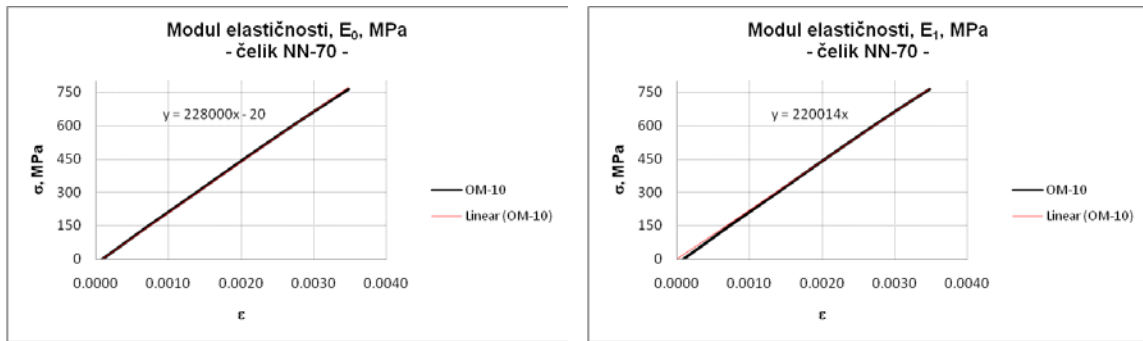
Kao rezultat ispitivanja niskocikličnim zamorom na jednoj epruveti (jednom amplitudnom nivou deformacije) je zapis u EXCEL-u, sl. 2.33, koji se upotrebom dostupnih alata u EXCEL-u može dalje obrađivati prema našim zahtevima.

Vreme [s]	Broj max	Broj min	Strain [%]	Sila [kN]
0			0.0014	-0.6743
0.1	1		0.0012	-0.6841
0.2			0.0014	-0.6548
0.3			0.0016	-0.6484
0.4			0.0015	-0.6743
0.5			0.0015	-0.6646
0.6			0.0015	-0.6678
0.7		2	0.0014	-0.6646
0.8			0.0014	-0.6548
0.9			0.0015	-0.6484
1			0.0015	-0.6646
1.1			0.0015	-0.6484
1.2	1		0.0016	-0.6743
1.3			0.0015	-0.6711
1.4			0.0015	-0.6678
1.5			0.0014	-0.6711
1.6			0.0015	-0.6678
1.7			0.0014	-0.6613
1.8		2	0.0016	-0.6451
1.9			0.0013	-0.6646
2		3	0.0013	-0.6646
2.1			0.0014	-0.6776
2.2			0.0013	-0.6613
2.3			0.0014	-0.6776
2.4			0.0036	-0.4796

Slika 2.33. Zapis u EXCEL-u posle ispitivanja niskocikličnim zamorom na jednoj epruveti

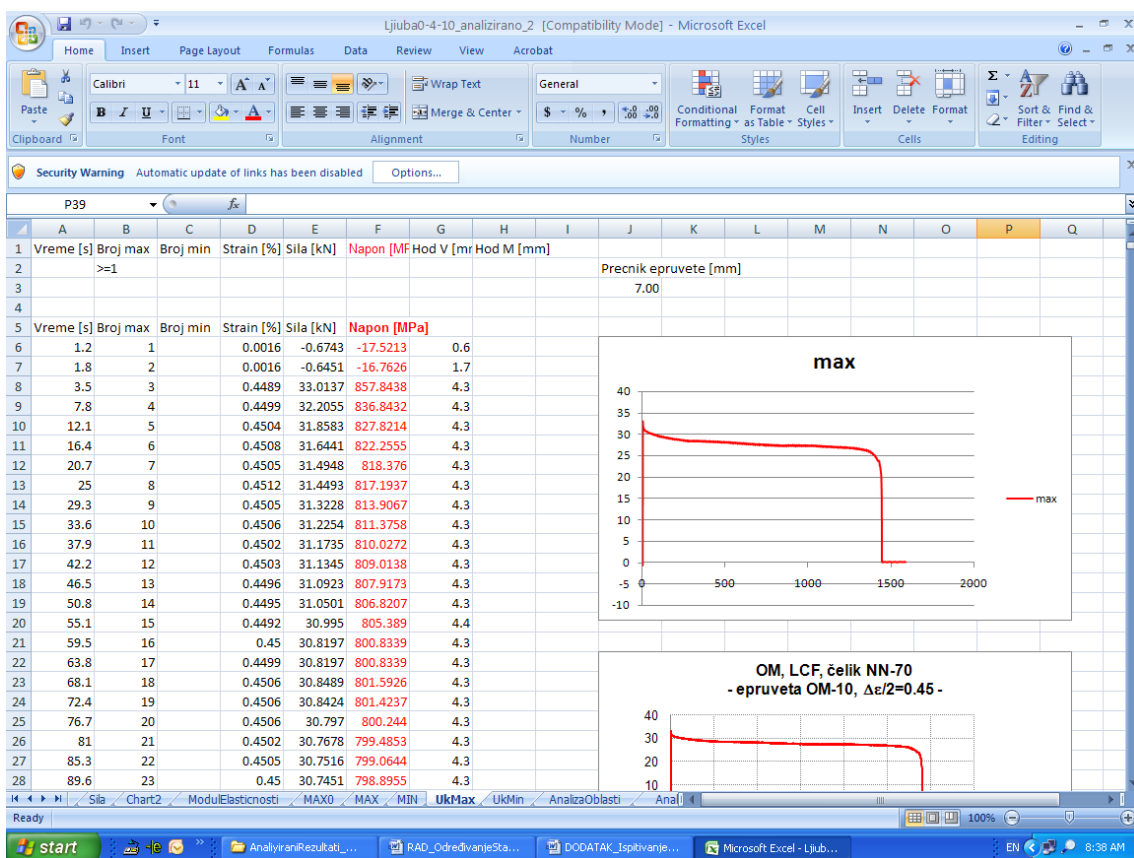
Pre obrade rezultata moguće je grubo odrediti ciklus u kome dolazi do značajnog pada sile,  $N_{procena}$ . Za određivanje pokazatelja niskocikličnog zamora materijala predstavljenih kroz Cikičnu naponsko - deformacionu krivu i Osnovnu krivu niskocikličnog zamora potrebno je izvršiti sledeće analize rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom:

1. Određivanje modula elastičnosti iz ciklusa  $N_{1/4}$ , sl. 2.34.
2. Za svaki amplitudni nivo deformacije (svaku epruvetu) filtriranjem podataka upariti ekstremne vrednosti sila opterećenja i broja ciklusa, oslobađajući se viška podataka, sl. 2.35. Potrebno je filtriranje za pozitivne i negativne vrednosti sila opterećenja.



Amplitudni nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.45$ , Brzina opterećenja 330 MPa/s

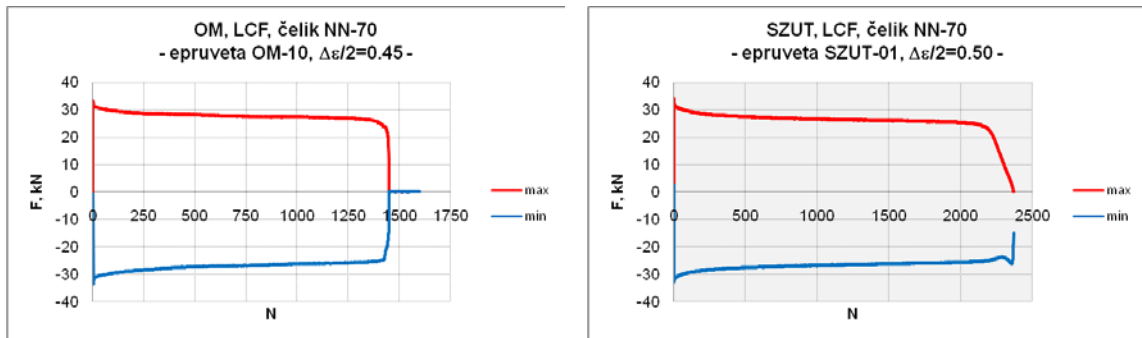
Slika 2.34. Dijagrami modula elastičnosti iz ciklusa  $N_{1/4}$



Slika 2.35. Zapis u EXCEL-u posle filtriranja podataka

3. Nacrtati dijagrame ekstremnih vrednosti sila opterećenja i broja ciklusa (F-N krive) za svaki amplitudni nivo deformacije, sl. 2.36.
4. Nacrtati dijagrame određivanja područja stabilizacije (pozitivni deo F-N krivih), tab. 2.1 i sl. 2.18 i 2.37, (određivanje oblasti niskocikličnog zamora i karakterističnih histereza) posle:
  - a) Određivanja maksimalne sile i ciklusa  $N_{start}$ ,

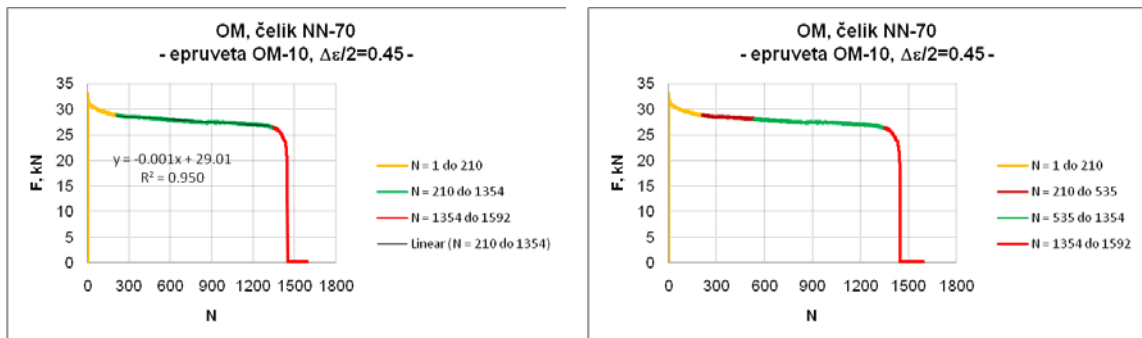
- b) Određivanja ciklusa  $N_{ps}$  i  $N_{ks}$  i oblasti stabilizacije,
- c) Određivanja ciklusa  $N_{pNDT}$ ,
- d) Određivanja ciklusa  $N_{-25\%}$ ,
- e) Određivanja ciklusa  $N_{-50\%}$ ,
- f) Određivanja ciklusa  $N_{-100\%}$  i  $N_{end}$ .



OM –osnovni materijal

SZUT – simulirana zona uticaja toplote

Slika 2.36. Dijagrami ekstremnih vrednosti sila opterećenja i broja ciklusa



Područje stabilizacije,  $N = 210$  do  $1354$

Područje inicijacije do praga NDT,  $N = 210$  do  $535$

Slika 2.37. Dijagrami određivanja područja stabilizacije i praga NDT

5. Određivanje karakterističnih podataka stabilizovanih histerezisnih krivih, tab. 2.2 i sl. 2.38:

- a) Očitavanje ekstremnih vrednosti sile opterećenja  $F_{max}$  i  $F_{min}$ ,
- b) Utvrđivanje mesta preseka histerezisne krive i pozitivnog dela ose deformacije (određivanje koeficijenata prave,  $m$  i  $n$ , tab. 2.2), sl. 2.39. Ovo se može uraditi i grafički [82] u nekom od programa za precizno crtanje (Corel, AutoCad, SolidWorks i dr.)
- c) Izračunavanje  $\Delta\epsilon_p/2$ ,  $\Delta\epsilon_e/2$  i  $\Delta\sigma/2 = F_{sr}/A_0 \cdot 1000$ .

Tabela 2.2. Karakteristični podaci stabilizovanih histereza LCF OM čelika NN-70

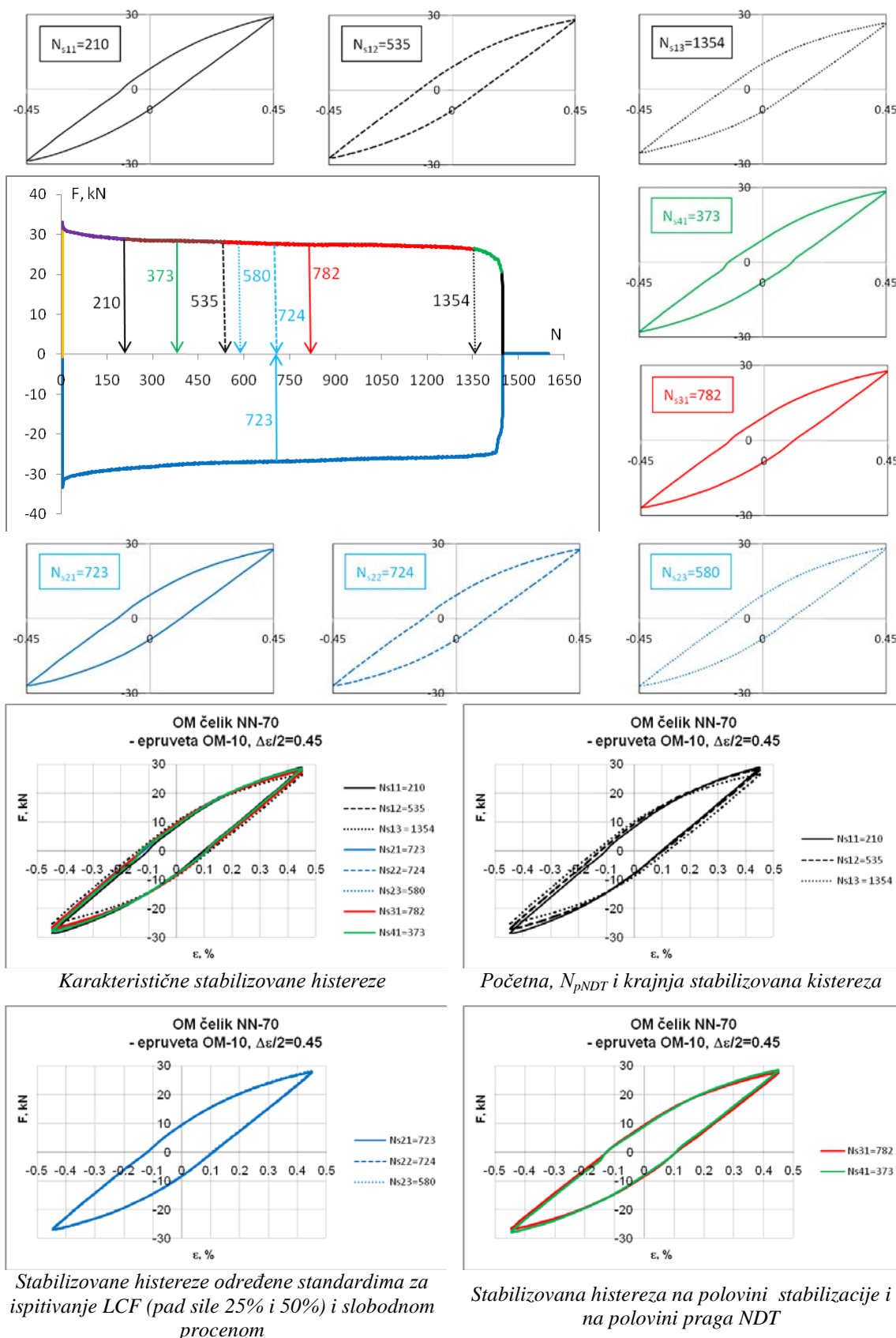
Oznaka epruvete				koeficijenti prave		Dimenzije epruvete, $d_0=7.00$ mm, $A_0=38.48$ mm <sup>2</sup>					
OM-10		$N, N_s$	$\Delta\epsilon/2, \%$	$m$	$b$	$\Delta\epsilon_p/2, \%$	$\Delta\epsilon_e/2, \%$	$F_{max},$ kN	$F_{min},$ kN	$F_{sr},$ kN	$\Delta\sigma/2,$ MPa
	$F=max$	3						33.01	-33.26	33.138	861
$N_{ps}$	$N_{s11}$	210	0.45	84.614	8.250	0.0975	0.3524	28.88	-28.66	28.776	747
$N_{pNDT}$	$N_{s12}$	535	0.45	80.489	8.370	0.1039	0.3460	28.17	-27.07	27.623	717
$N_{ks}$	$N_{s13}$	1354	0.45	80.794	9.771	0.1209	0.3290	26.47	-25.34	25.905	673
$N_{.25\%/2}$	$N_{s21}$	723	0.45	77.571	8.615	0.1110	0.3389	27.74	-26.82	27.286	709
$N_{.50\%/2}$	$N_{s22}$	724	0.45	80.485	8.758	0.1088	0.3411	27.69	-26.86	27.279	708
$N_{procena}/2$	$N_{s23}$	580	0.45	86.793	8.912	0.1026	0.3473	28.09	-27.08	27.593	716
$N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	782	0.45	86.632	9.394	0.1084	0.3415	23.49	-26.83	27.613	717
$N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	373	0.45	104.861	11.066	0.1055	0.3444	28.44	-27.49	27.966	726

Tabela 2.3. Glavni podaci za sve nivoe deformacije za jednu od stabilizovanih histereza

NN-70	Prag NDT						
	$N_s=N_{s41}$	$\Delta\epsilon/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\sigma_{max},$ MPa	$\sigma_{min},$ MPa	$\Delta\sigma/2,$ MPa
OM-09	1670	0.0035	0.000371	0.003129	620.36	-723.63	672.00
OM-01	527	0.0035	0.000423	0.003077	661.19	-715.46	688.33
OM-10	373	0.0045	0.001055	0.003445	739.02	-714.36	726.69
OM-02	110	0.0050	0.001450	0.003550	716.42	-700.95	708.68
OM-03	416	0.0050	0.001599	0.003401	723.42	-725.74	724.58
OM-06	194	0.0060	0.002308	0.003692	744.84	-706.77	725.80
OM-07	154	0.0060	0.002329	0.003671	753.52	-726.33	739.93
OM-04	63	0.0070	0.003106	0.003894	779.75	-733.67	756.71
OM-05	204	0.0070	0.003452	0.003548	723.92	-691.59	707.75
OM-08	112	0.0080	0.004319	0.003681	759.68	-707.27	733.48

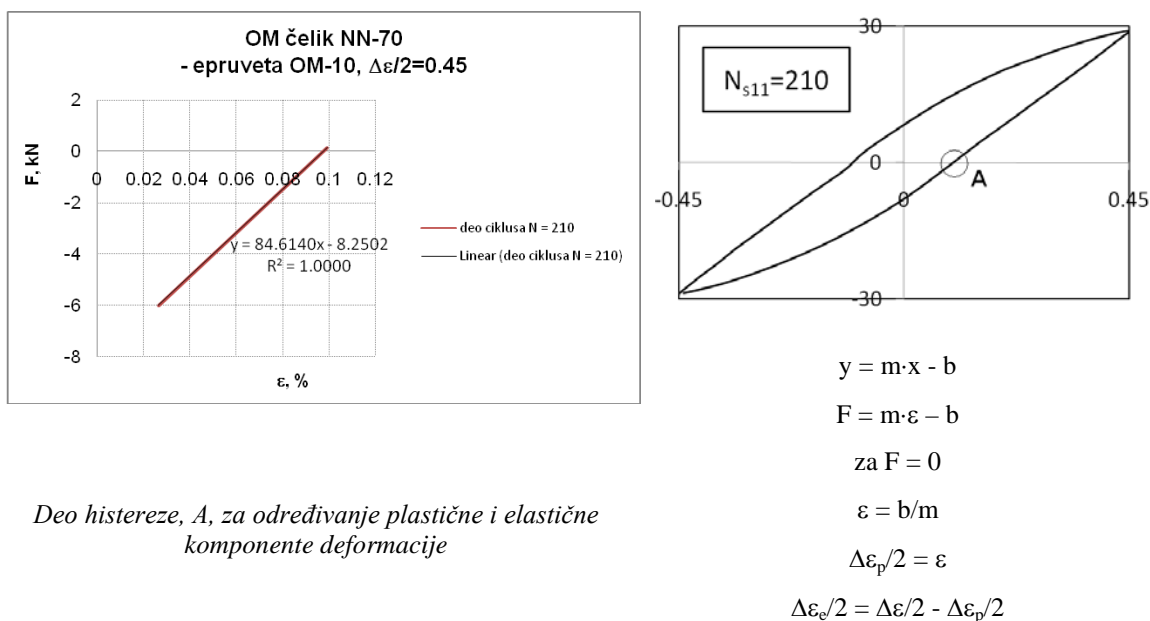
Tabela 2.4. Dodatni podaci, svi nivoi deformacije za jednu od stabilizovanih histereza

NN-70	Prag NDT		log			
	$N_s=N_{s41}$	$N_f=N_{s12}$	$N_f$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\Delta\sigma/2$
OM-09	1670	2527	3.402605	-3.430174	-2.504648	2.827369
OM-01	527	668	2.824776	-3.373432	-2.511904	2.837796
OM-10	373	535	2.728354	-2.976629	-2.462847	2.861348
OM-02	110	146	2.164353	-2.838740	-2.449728	2.850453
OM-03	416	575	2.759668	-2.796023	-2.468454	2.860087
OM-06	194	261	2.416641	-2.636738	-2.432755	2.860818
OM-07	154	210	2.322219	-2.632775	-2.435251	2.869190
OM-04	63	77	1.886491	-2.507733	-2.409656	2.878929
OM-05	204	272	2.434569	-2.461960	-2.449987	2.849883
OM-08	112	142	2.152288	-2.364582	-2.434075	2.865386



Slika 2.38. Karakteristične stabilizovane histereze ispitivanja LCF

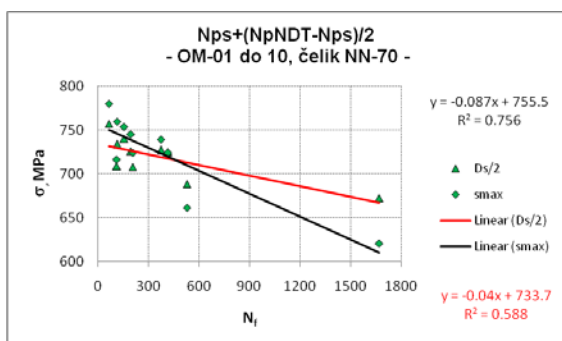




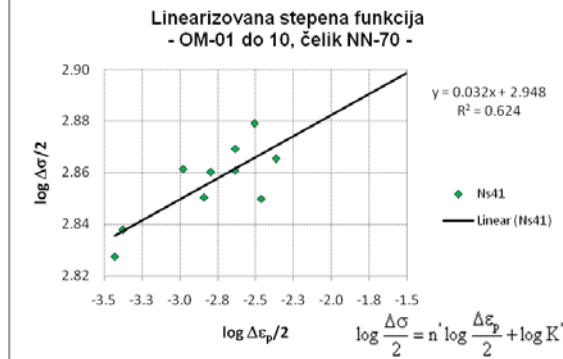
Deo histereze, A, za određivanje plastične i elastične komponente deformacije

Slika 2.39. Određivanje koeficijenata prave  $m$  i  $n$ . Izračunavanje  $\Delta\epsilon_p/2$  i  $\Delta\epsilon_e/2$ .

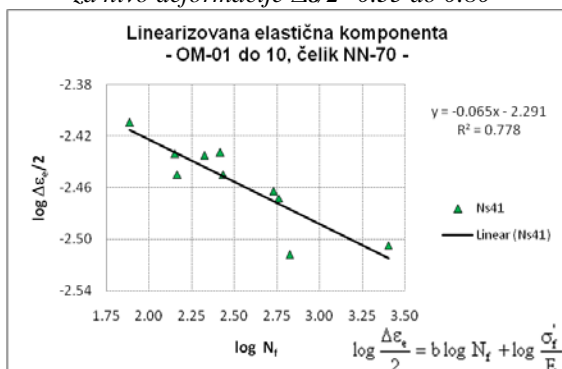
6. Grupisanje podataka za sve amplitudne nivo deformacije, tab. 2.3 i 2.4, konstruisanje Ciklične naponsko deformacione krive i Osnovne krive niskocikličnog zamora i poređenje Ciklične i Monotone naponsko deformacione krive, sl. 2.40:
  - a) Određivanje eksponenta i koeficijenta linearizovane stepene funkcije,
  - b) Određivanje eksponenta i koeficijenta linearizovane elastične komponente,
  - c) Određivanje eksponenta i koeficijenta linearizovane plastične komponente.
7. Grupisanje podataka Ciklično naponsko deformacionih krivih i Osnovnih krivih niskocikličnog zamora za sve odabrane stabilizovane histereze, tab. 2.5, 2.6 i 2.7.
8. Određivanje prelaznog veka za sve odabrane stabilizovane histereze, prema podnaslovu 2.3.4 ovog poglavlja.



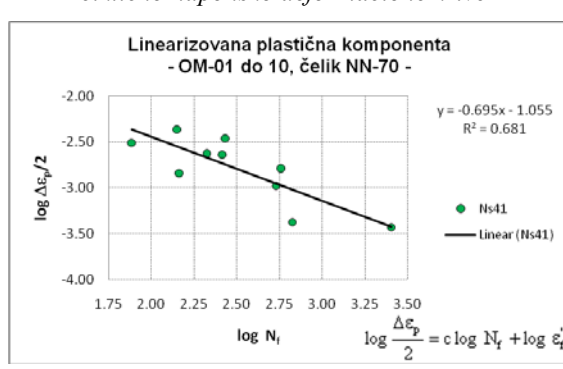
Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\varepsilon/2=0.35$  do  $0.80$



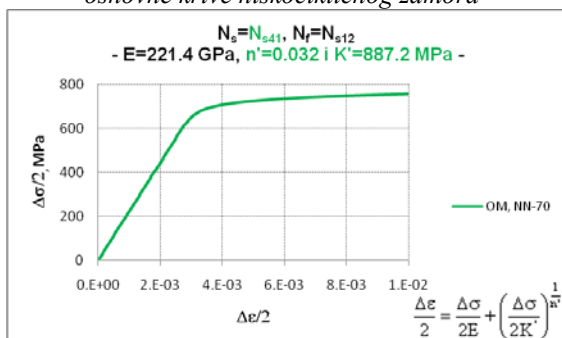
Eksponent  $n' = 0.032$  i koeficijent  $\log K' = 2.948$  ciklično naponsko deformacione krive



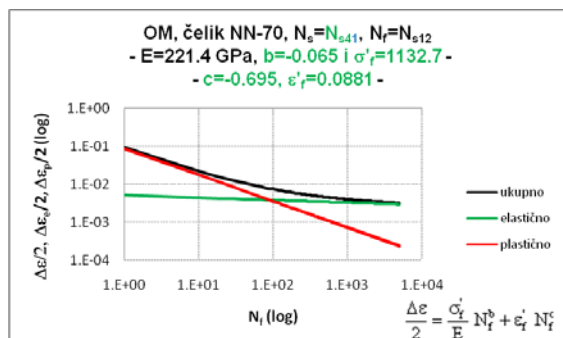
Eksponent  $b = -0.065$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.291$  osnovne krive niskocikličnog zamora



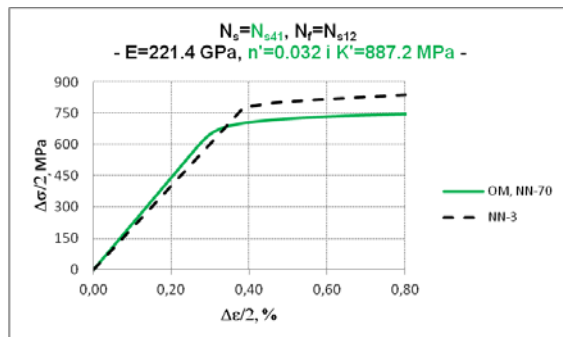
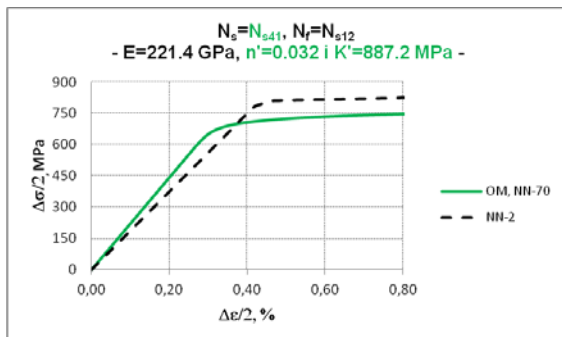
Eksponent  $c = -0.695$  i koeficijent  $\log \varepsilon_f' = -1.055$  osnovne krive niskocikličnog zamora



Ciklična naponsko deformaciona kriva



Osnovna kriva niskocikličnog zamora



Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive

Slika 2.40. Pokazatelji ponašanja materijala pri niskocikličnom zamoru

Tabela 2.5. EkspONENTI  $n'$  i KOEFICIJENTI  $K'$  cikličnih naponsko deformacionih krivih

OM			$n'$	log $K'$	$K'$ , MPa
NN-70	$N_f$	$N_s$			
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>0.031</b>	2.954	<b>899.5</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>0.032</b>	2.948	<b>887.2</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>0.047</b>	2.976	<b>946.2</b>
$N_{s21}=N_{-25\%}/2$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>0.047</b>	2.976	<b>946.2</b>
$N_{s22}=N_{-50\%}/2$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>0.045</b>	2.972	<b>937.6</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>0.048</b>	2.987	<b>970.5</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>0.047</b>	2.976	<b>946.2</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>0.032</b>	2.948	<b>887.2</b>
Linearizovana stepena funkcija			$\log \frac{\Delta\sigma}{2} = n' \log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \log K'$		
Ciklična naponsko deformaciona kriva			$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$		

Tabela 2.6. EkspONENTI  $b$  i KOEFICIJENTI  $\sigma'_f$  elastične komponente osnovnih krivih NCZ

OM						$E_{sr0}$ , MPa	$E_{sr1}$ , MPa	$E=E_{sr}$ , MPa
NN-70						223328	219427	<b>221378</b>
	$N_f$	$N_s$	$b$	log $\sigma'_f/E_{sr}$	$\sigma'_f/E_{sr}$	$\sigma'_{f0}$	$\sigma'_{f1}$	$\sigma'_f$
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.085</b>	-2.231	0.0059	1312.0	1289.1	<b>1300.6</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.065</b>	-2.291	0.0051	1142.7	1122.8	<b>1132.7</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.061</b>	-2.292	0.0051	1140.1	1120.2	<b>1130.1</b>
$N_{s21}=N_{-25\%}/2$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.060</b>	-2.283	0.0052	1164.0	1143.6	<b>1153.8</b>
$N_{s22}=N_{-50\%}/2$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.057</b>	-2.291	0.0051	1142.7	1122.8	<b>1132.7</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.061</b>	-2.280	0.0052	1172.0	1151.6	<b>1161.8</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.066</b>	-2.288	0.0052	1150.6	1130.6	<b>1140.6</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.070</b>	-2.289	0.0051	1148.0	1128.0	<b>1138.0</b>
Linearizovani deo elastične komponente			$\log \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma'_f}{E}$					
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c$					

Tabela 2.7. EkspONENTI  $c$  I KOEFICIJENTI  $\epsilon'_f$  PLASTIČNE KOMPONENTE OSNOVNIH KRIVIH NCZ

OM			c	log $\epsilon'_f$	$\epsilon'_f$
	$N_f$	$N_s$			
<b>NN-70</b>					
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.872</b>	-0.654	<b>0.2218</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.695</b>	-1.055	<b>0.0881</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.564</b>	-1.213	<b>0.0612</b>
$N_{s21}=N_{-25\%}/2$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.594</b>	-0.981	<b>0.1045</b>
$N_{s22}=N_{-50\%}/2$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.620</b>	-0.903	<b>0.1250</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.574</b>	-1.114	<b>0.0769</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.613</b>	-1.192	<b>0.0643</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.738</b>	-1.043	<b>0.0906</b>
Linearizovani deo plastične komponente			$\log \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \epsilon'_f$		
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \epsilon'_f N_f^c$		

## 2.4. Uticaj kavitacije na ponašanje materijala

Kavitacija (engl. *cavity* – šupljina) je pojava koja podrazumeva stvaranje i imploziju parnih ili paro-gasnih mehura u tečnosti koja struji. Pri imploziji kavitacionih mehura dolazi do niza neželjenih pojava: povećanja pritiska, povišenja temperature u okolini implozije kavitacionih mehura, hemijske korozije i elektrohemijskih procesa.

Kavitacija se naziva i hladno ključanje. Za razliku od ključanja, pri zagrevanju kod koga pritisak raste u zavisnosti od dovedene toplote, kod kavitacije se ključanje odvija prema promenama pritiska u prostoru koji okružuje mehur.

Kavitacija je neželjena pojava u hidrosistemima jer je praćena šumom, vibracijama, povećanim gubitkom energije i razaranjem površina materijala, sl. 2.41, koje su u kontaktu sa tečnošću.



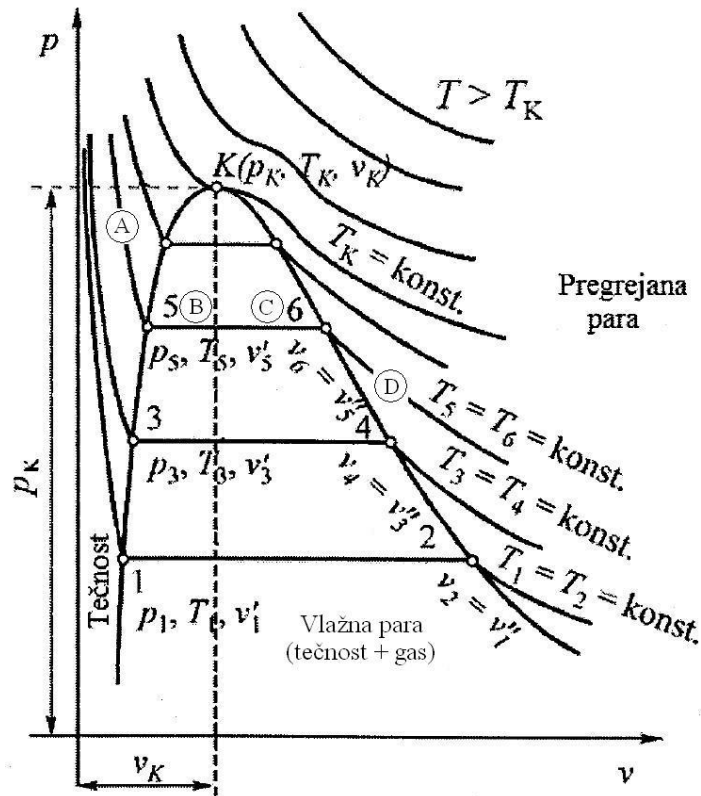
Slika 2.41. Oštećenja pod dejstvom kavitacije na lopatici protočne pumpe [129]

### 2.4.1. Ponašanje fluida pri prelasku iz tečnosti u gasovito stanje

Na sl. 2.42, p-V dijagramom, prikazano je ponašanje fluida pri prelasku iz tečnosti u gasovito stanje. Na dijagramu se uočavaju oblasti sa homogenim fazama i oblasti u kojima se menja faza.

Kriva A-B-C-D prikazuje proces pri konstantnoj temperaturi,  $T_5 = T_6$ , a pri smanjenju pritiska kada se fluidu stanja A menja pritisak i zapremina. Fluid je u tečnom

stanju pri smanjenju pritiska do tačke B, u tački B počinje isparavanje i traje do tačke C u toku koga je pritisak konstantan. Između tačaka B i C tečnost je i u tečnom i gasovitom stanju (vlažna para).



Slika 2.42. p-V dijagram [130]

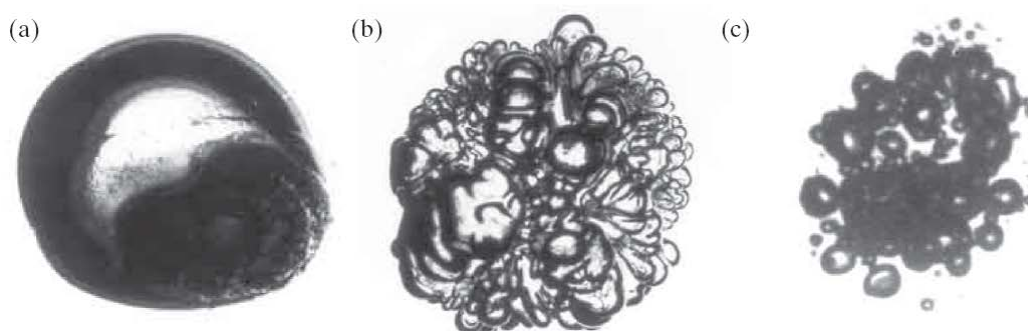
Daljim opadanjem pritiska do tačke D dolazi do pregrevanja pare. Suprotan proces odgovara kondenzaciji koja počinje u tački C a završava se u tački B. Na dijagramu je prikazana kritična izoterma,  $T_K$ , koja ima prevojnu tačku, K, koja se naziva kritična tačka i u njoj tečnost direktno prelazi u stanje pregrevane pare.

Početak nastajanja kavitacije vezan je za veličinu pritiska u tečnosti. Kada pri strujanju tečnosti pritisak u mikrozapreminama dostigne kritičnu vrednost  $p_K$  (vrednost pritiska isparavanja tečnosti na datoj temperaturi), formiraće se prvi mehuri pare, koji predstavljaju početak kavitacije.

Pad pritiska koji dovodi do raspada, implozije mehura i pojava kavitacije zavisi od uslova eksploatacije i konstruktivnih svojstava protočnih elemenata.

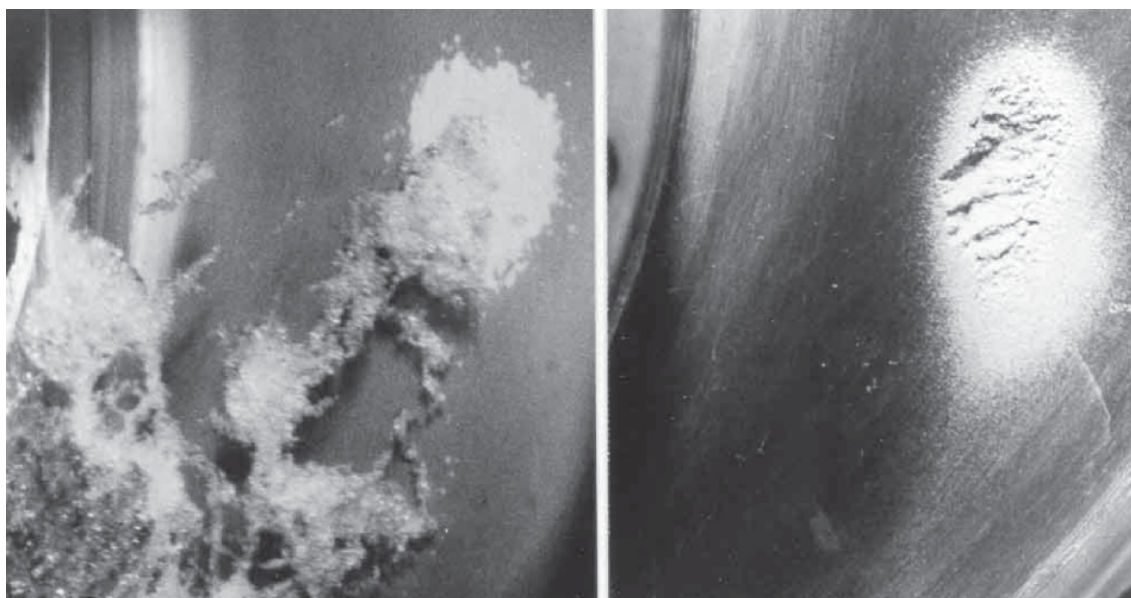
### 2.4.1.1. Kavitacioni mehur

Nastajanje prvih mehura pare predstavlja početak procesa kavitacije i zavisi od polja pritiska, temperature tečnosti, vrste tečnosti, režima strujanja, sadržaja nerastvorenih gasova i mehaničkih primesa koji predstavljaju jezgra kavitacije, sl.2.43.



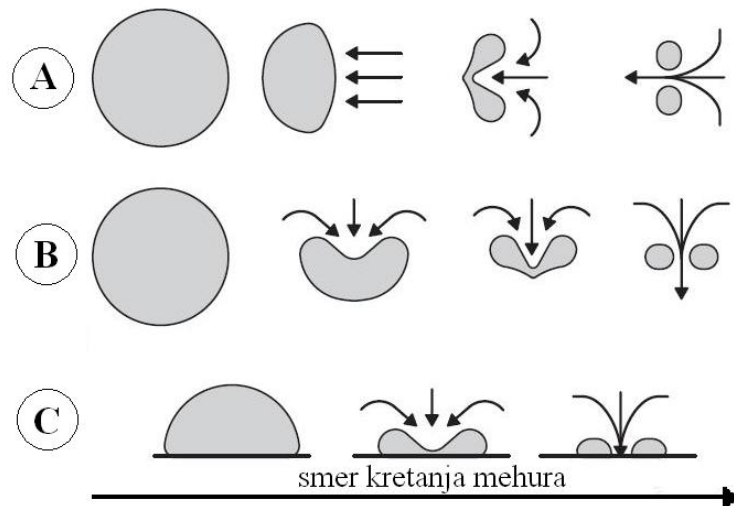
*Slika 2.43. Kavitacioni mehur a) pre, b) na početku i c) posle rapada i implozije [129,131]*

Zbog promene pritiska u fluidu ili uticaju krutih granica, kavitacioni mehuri uglavnom odstupaju od kuglasto simetričnog oblika. Mehuri implodiraju formirajući mikromlaz koji oštećuju površinu na koju je usmeren, što se može videti na sl. 2.44.



*Slika 2.44. Mehuri a) tokom strujanja i b) kavitaciono oštećenje mikromlazom [129,132]*

Tri tipična slučaja raspada mehura [133], prikazana su na sl. 2.45. Kavitacione mehure nastale u zoni niskih pritisaka (pritisak isparavanja tečnosti na određenoj temperaturi) nosi struja tečnosti u zonu povišenog pritiska, sl. 2.45 A. U polju povišenog pritiska prestaju uslovi za opstanak mehura. Para sadržana u mehuru trenutno se kondenzuje uz pojavu visokih pritisaka i temperatura i aktiviranja hemijskih, prvenstveno korozivnih procesa. Prilikom implozije (kondenzacije) kavitacionih mehura u lokalnim mikrozapreminama vrednosti pritiska iznose nekoliko stotina bara a vrednosti temperature nekoliko hiljada °C. Ako se kondenzacija završava blizu površine čvrstog tela ili na njoj, sl. 2.45 B i C, dolazi do pojave razaranja površine materijala koje se naziva se razaranje pod dejstvom kavitacije.



A - Mehuri kreće u područje visokog pritiska, B - Raspadanje mehura blizu zida čvrstog tela,  
C-Polusferični mehur prianja na zid čvrstog tela

Slika 2.45. Tipični slučajevi raspadanje mehura [134]

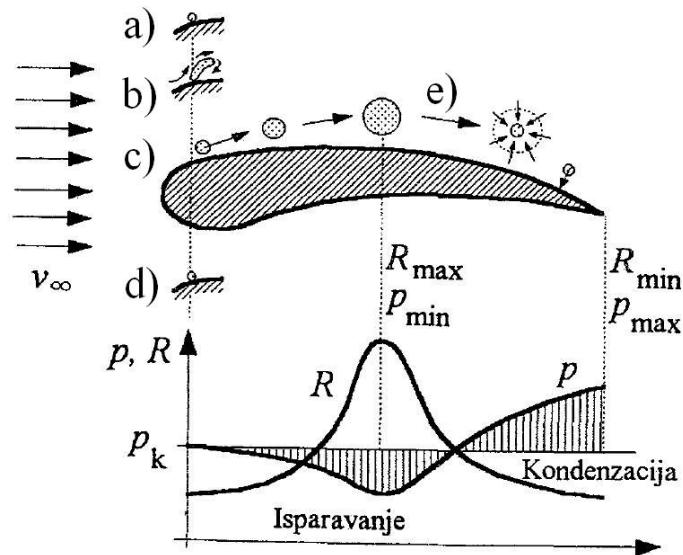
Implozijom kavitacionih mehura stvaraju se udarni talasi i mikromlazevi koji na površinskim slojevima elemenata hidrauličnih mašina, prouzrokuju zamor materijala i njegovo razaranje u lokalnim mikrozapreminama, a posledica toga je gubitak mase materijala. U kom stepenu će doći do oštećenja i degradacije elemenata izloženih dejstvu kavitacije zavisi od hemijskog sastava, strukture, mehaničkih i antikorozijskih svojstava materijala od kojih su izrađeni.



### 2.4.1.2. Faze procesa kavitacije

U procesu kavitacije postoje tri faze: **stvaranje mehura, rast mehura i implozija (kondenzacija) mehura**. Radi ilustracije, na sl. 2.46, prikazane su ove faze na primeru opstrujavanja čvrste površine tela.

U prvoj fazi isparavanjem tečnosti nastaju kavitacioni mehuri, a oni se najčešće formiraju oko jezgra koje predstavlja mehur nerastvorenog gasa u tečnosti. U odgovarajućem preseku na telu, sl. 2.46a, pritisak,  $p_k$ , dostiže kritičnu vrednost i tada mehur nerastvorenih gasova koji je na zidu raste zapremina isparavanjem tečnosti.



Slika 2.46. Stvaranje i promena mehura pri opstrujavanju tela [135]

U drugoj fazi mehuri nošeni strujom tečnosti, stižu u zonu još nižih pritisaka, gde im se obim povećava usled dodatnog isparavanja, kao i zbog širenja gasa i pare. Sa povećanjem dimenzija gubi se stabilnost oblika mehura, pa se izdužuju, a ponekad i dele. Mehur raste i deformiše se, tj. izdužuje se u smeru strujanja, sl. 2.46b. U trenutku kada hidrodinamičke sile nadvladaju površinske sile prijanjanja mehura na čvrstu površinu, mehur se odvaja od nje, sl. 2.46c. Na mestu sa koga se mehur odvojio, započinje ciklus stvaranja novog mehura, sl. 2.46d. Proces se nastavlja dok postoje uslovi održavanja kritičnog pritiska,  $p_k$ .

U trećoj fazi mehuri stižu u zonu povećanog pritiska gde je  $p > p_k$  kada prestaju uslovi za opstanak parne faze. Odigrava se kondenzacija pare i mehur implodira, sl. 2.46e. Pri kondenzaciji mehura zapremina parne faze se trenutno smanjuje i okolna tečnost velikom brzinom ustrujava u prostor mehura, a to je praćeno udarima i izraženim porastom pritiska. Zbog potpunog kondenzovanja, parni mehur nestaje, a mehur u kome je bila mešavina pare i gasa, ostaje ispunjen samo gasom. Zbog velikog porasta pritiska gas se sabija, a pri rasterećenju se širi. Ako mehuri implodiraju na granicama strujnog prostora, materijal površine je izložen jakim udarnim opterećenjima, praćenim korozionim dejstvom, zbog čega dolazi do razaranja. Stepem razaranja zavisi od intenziteta kavitacione pojave, ali i od vrste materijala i stanja površina.

#### 2.4.2. Vrste kavitacije

U zavisnosti od načina smanjenja pritiska u tečnosti ispod pritiska isparavanja na određenoj temperaturi, razlikuju se:

1. **talasna (akustična) kavitacija**, koju izazivaju zvučni talasi,
2. **strujna (hidrodinamička) kavitacija**, koja nastaje snižavanjem pritiska tečnosti a to smanjenje pritiska može biti uslovljeno prekomernim padom pritiska ili lokalnim ubrzanjem struje tečnosti (brzina strujanja raste uz istovremeni pad pritiska, čime se stvaraju uslovi za nastajanje kavitacije).

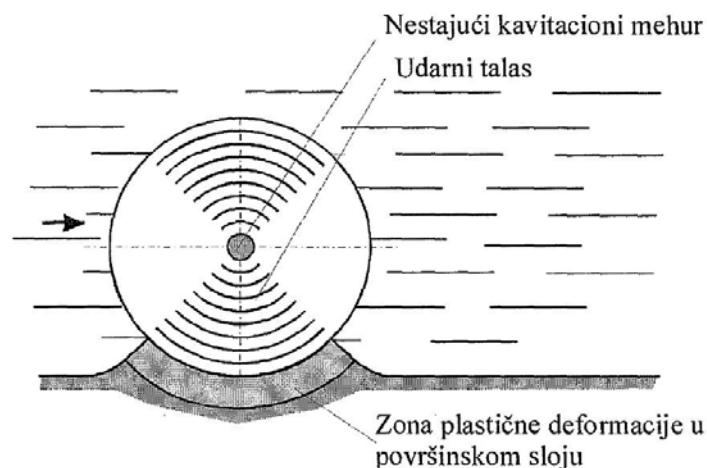
U tečnosti postoje nerastvoreni gasovi koji se nalaze u obliku mehura. Smatra se da ovi nerastvoreni gasovi predstavljaju centre kavitacije. Mehuri gasa nošeni strujom tečnosti dolaze u polje sniženog pritiska koji odgovara temperaturi isparavanja i tada difuzijom kroz površinu mehura ustrujava para a zapremina mehura raste.

Kada mehur nošen strujom tečnosti dođe u polje povišenog pritiska dolazi do kondenzacije pare i zapremina mehura se smanjuje. Ova pojava se naziva gasna kavitacija. Gasni mehur se tom prilikom može smanjiti na dimenzije koje dozvoljava stišljivost gasa.

Mehur u tečnosti može biti parni, gasni ili mešoviti (paro-gasni). Ako je kavitacija nastala samo isparavanjem tečnosti tada se naziva **parna** kavitacija a ako je centru kavitacije prethodio gasni mehur kavitacija se naziva **gasna**.

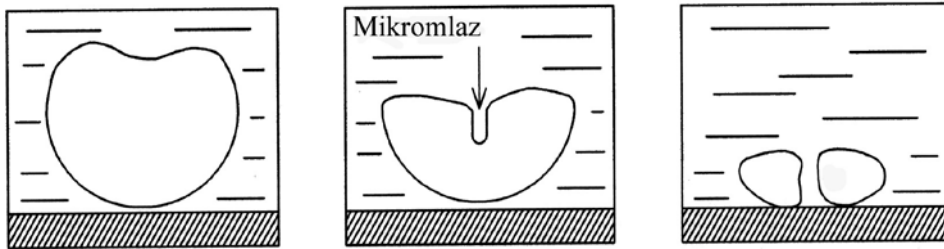
### 2.4.3. Mehanizmi kavitacije

Implozije kavitacionih mehura uslovljavaju stvaranje **udarnih talasa i mikromlazeva**. Prilikom implozije mehura, okolna tečnost ustrujava u mehur velikom brzinom. Kada je mehur smanjen, pritisak u mehuru je visok a brzina tečnosti na graničnoj površini je velika. Kada pritisak dostigne maksimalnu vrednost, na graničnoj površini nastaje pritisni talasni front. Ovaj front se rasprostire u tečnost kada mehur ponovo počne da raste. S obzirom da se implozija i rast mehura ponavljaju, čvrsta površina u tečnosti je izložena periodičnom pritisku, koji može prouzrokovati zamor površine materijala, sl. 2.47.



Slika 2.47. Implozija kavitacionog mehura i obrazovanje udarnih talasa [130,136]

Kavitacioni mehur u procesu implozije menja oblik izazivajući mikro strujanje tečnosti. Inicijalni sferni mehur se smanjuje asimetrično a **mikromlaz** tečnosti je usmeren prema čvrstoj površini, sl. 2.48. Ovo mikrostrujanje u daljem procesu implozije mehura probija mehur velikom brzinom. Brzina mikromlaza zavisi od velikog broja faktora, najviše od pritiska. Proračuni pokazuju da je brzina mikromlaza preko 100 m/s. Ova brzina može stvoriti pritisak od nekoliko stotina bara, što je dovoljno da ošteti većinu materijala koji se uobičajeno koriste za izradu elemenata hidrauličnih mašina.



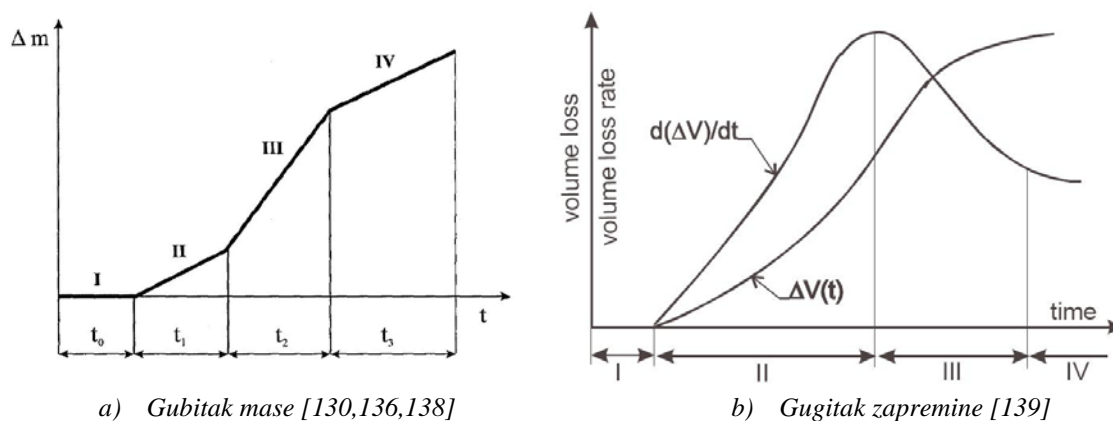
Slika 2.48. Šematski prikaz uzastopnih stadijuma asimetrične implozije mehura sa udarom mikromlaza o čvrstu površinu [130,136]

Dosadašnja istraživanja pokazuju da su materijali u zoni dejstva kavitacije izloženi prvenstveno mehaničkom dejstvu mikromlazeva i udarnih talasa i ono se smatra jednim od osnovnih faktora razaranja. Osim mehaničkog dejstva u zoni dejstva kavitacije su prisutni: hemijska korozija, elektrohemijski procesi i lokalna povišena temperature. Ovi vidovi kavitacionog dejstva takođe se mogu javiti kao faktori koji mogu da izazovu razaranje materijala.

#### 2.4.4. Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije

Razaranje pod dejstvom kavitacije je dinamički fenomen izazvan ponavljanjem dejstva kavitacionih mehura koji implodiraju i uslovljavaju nastanak mikromlazeva i udarnih talasa, što dovodi do nastanka visokih pritisaka i temperatura u lokalnim mikrozapreminama. U slučaju ponovljenih impulsnih udara, dokazano je da kavitaciono razaranje ima karakter zamora. Zbog toga plastična deformacija, iniciranje prslina i njihov razvoj zavise od mehaničkih svojstava materijala (tvrdoća, modul elastičnosti, zatezna čvrstoća i dinamička čvrstoća), mikrostrukture materijala (veličina zrna, faza i broja grešaka u materijalu), a takođe i od hrapavosti površine.

Četiri karakteristična perioda razaranja materijala pod dejstvom kavitacije prikazani su na sl. 2.49 [137, 138]. U laboratorijskim uslovima, razaranje materijala pod dejstvom kavitacije se procenjuje merenjem gubitaka mase [138] ili zapremine [139] u toku vremena izlaganja materijala dejstvu kavitacije. Krive, sl. 2.49a i b, dobijene eksperimentalnim putem, daje vezu između gubitaka mase, odnosno zapremine, i vremena dejstva kavitacije i pokazuje četiri karakteristična perioda razaranja pod dejstvom kavitacije.



Slika 2.49. Karakteristične krive razaranja pod dejstvom kavitacije

**Prvi period ( $t_0$ ), (I)**, je tzv. inkubacioni period, kada praktično nema gubitka mase, odnosno zapremine, usled dejstva kavitacije. U ovom periodu materijal akumulira energiju i počinje plastična deformacija sa приметnom pojavom mikro i makro reljefa. Tokom ovog perioda mogu se pojaviti zamorni procesi i ojačavanje materijala. U ovom periodu se samo javljaju neznatna površinska oštećenja oblika jamica nastalih gubitkom mikroskopskih čestica, sa različitih mesta na površini. Određivanje trajanja ovog perioda zavisi od tačnosti merenja uzoraka prilikom ispitivanja.

**Drugi period ( $t_1$ ), (II)**, je period početka neznatnog razaranja površinskog sloja praćenog minimalnim gubitkom mase. Kada je granica deformacionog ojačavanja dostignuta, kontinuirana plastična deformacija vodi ka odvajanju materijala i nastajanju i širenju prslina blizu površine, što rezultuje uklanjanjem materijala odnosno pojavom gubitka mase materijala. Oštećena površina postaje hrapavija sa velikim brojem malih udubljenja.

**Treći period ( $t_2$ ), (III)**, predstavlja period ubrzanog razaranja, praćenog izraženim gubitkom mase. Sitni krateri nastali u prethodnom periodu se spajaju obrazujući čitave jame na površinskom sloju izloženom dejstvu kavitacije. Kavitaciona brzina može se povećavati do maksimalne vrednosti zbog deformacionog ojačavanja površine i razvoja prslina. Stepenn povećanja kavitacione brzine zavisice od vrste materijala i kavitacionih uslova. Kada počne gubitak mase, karakteristike površine se menjaju, javljaju se pukotine, duboke jame i zamor postaje očigledniji. U ovom periodu gubitak dela zapremine dostiže maksimalnu vrednost.

**Četvrti period ( $t_3$ ), (IV)**, je period u kome dolazi do usporenog razaranja, ali se jame i dalje spajaju i stvaraju velike kraterne na površini izloženoj dejstvu kavitacije.

Smanjenje kavitacione brzine tokom ovog perioda zavisi od mnogih faktora kao što su svojstva materijala, interakcija između struje tečnosti i pohabane površine preko procesa ravnjanja. Zaostali vazdušni ili gasni mehuri u dubokim kraterima mogu takođe delovati kao jastuk i apsorbovati deo energije udara. Ovo je period u kome dolazi do usporenog razaranja, ali se krateri i dalje spajaju i stvaraju velike šupljine i otvore na površini izloženoj dejstvu kavitacije. Oštećena površina koja odgovara ovom periodu generalno je hrapavija sa proširenijim kraterima. Ovaj stadijum kavitacije pojavljuje se samo pod određenim uslovima.

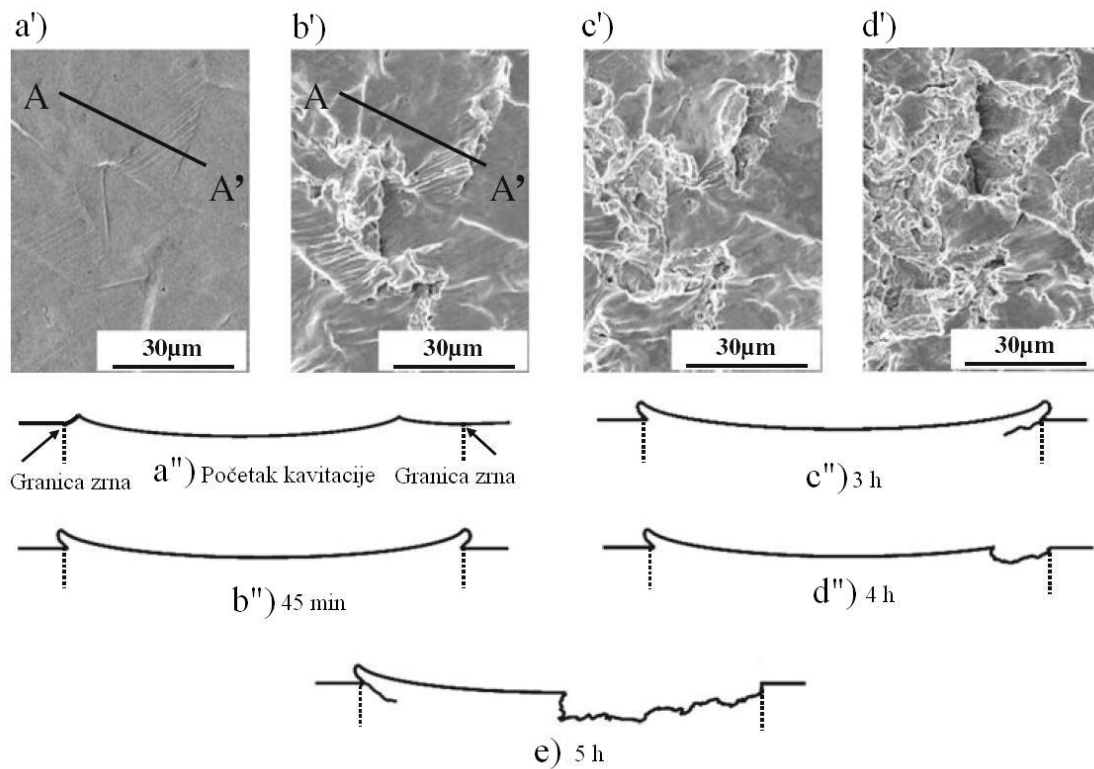
**U trećem periodu, (III),** uočava se slabljenje kavitacionog oštećenja. Gubitak zapremine se smanjuje. Ovo se objašnjava punjenjem jama vodom.

**Posljednji, četvrti, (IV),** period karakteriše gotovo konstantan gubitak dela zapremine izazvan erozijom.

Kao ilustracija objašnjenja razmatranih perioda i mehanizama razaranja pod dejstvom kavitacije može poslužiti sl. 2.50, na kojoj se na osnovu SEM fotografija i shematskog modela oštećenja na preseku A-A' posmatranjem oštećene površine uzorka vidi, da na početku izlaganja materijala dejstvu kavitacije, sl. 5.50a' (SEM fotografija), dolazi do plastične deformacije zbog dejstva kavitacije unutar kristalnih zrna i nakupljanja plastične deformacije na granicama zrna. Nakon 45 minuta, sl. 5.50b' (SEM fotografija), dolazi do značajnog nakupljanja plastične deformacije na granicama zrna. Posle 3 sata izlaganju kavitaciji, sl. 2.50c' (SEM fotografija), počinje formiranje prsline - poput utora u vrlo deformisanom područja pored tačke A', uz granicu zrna. Nakon 4 sata, sl. 2.50d' (SEM fotografija), događa se uklanjanje materijala, erozija zrna.

Izvorna površina je više puta bila izložena razaranja kavitacionim mehurima što je izazvalo plastičnu deformaciju površine materijala udarnim talasima i mikro mlazevima generisanih razarajućih mehura, shematski prikaz na sl. 2.50a". Višestruko ponavljanje delovanja razarajućih mehura na deformisanu površinu, izaziva postepeno širenje površine i akumuliranje plastične deformacije na granicama kristalnog zrna kao što je shematski prikazano na sl. 2.50b", što odgovara SEM fotografiji nakon 45 minuta delovanja kavitacije, sl. 2.50b'. Na granicama kristalnog zrna pojavljuju se istisnuti delovi plastično deformisanog materijala površine. Ovi delovi proizvode dodatno opterećenje u odnosu na susedna zrna s manjom plastičnom deformacijom i uzrokuju visoku koncentraciju napona, što rezultira prslinom kao na sl. 2.50c". Slika 2.50d"

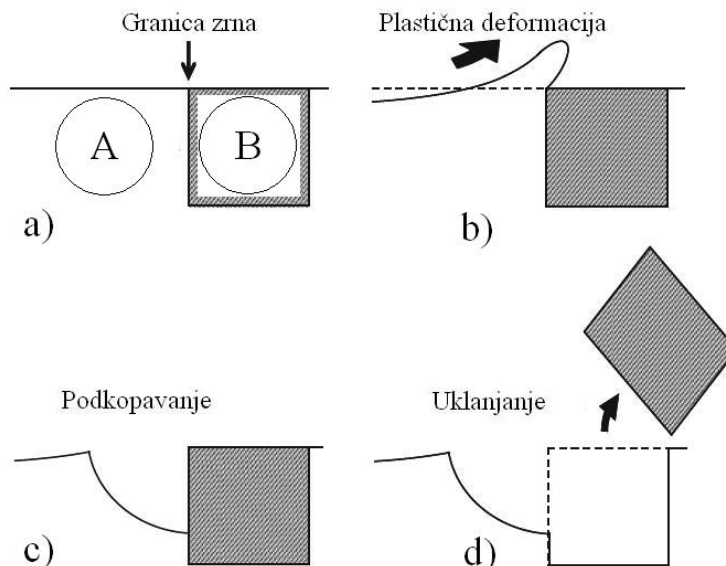
pokazuje da se oštećenje lako dogodilo na mestu stvaranje prsline. Slika 2.50c'' i d'' odgovaraju SEM fotografijama nakon 3 - 4 h, sl. 2.50c' i d'. Razvoj oštećenja nakon 5 sati shematski je prikazan na sl. 2.50e, gde vidimo da je razaranje pod dejstvom kavitacije zahvatilo širok prostor unutar zrna.



Slika 2.50. Mehanizam razaranja površine pod dejstvom kavitacije [140,141]

Kada su u pitanju tvrdi konstituenti, kao što su karbidi, model mehanizma razaranja pod dejstvom kavitacije prikazan je na sl. 2.51, a baziran na SEM opažanju [141]. Slika 2.51a prikazuje neoštećenu površinu neke eutektičke strukture koja se sastoji od metalne matrice i karbida. Slika 2.51b ilustruje da je metalna matrica mekša od karbida, što uzrokuje pojavu plastičnih deformacije u matrici. U ovom slučaju, karbidi igraju ulogu granice zrna iz modela mehanizma sa sl. 2.50. Plastične deformacije se javljaju u matrici, i istisnuti deo materijala se pojavljuje u blizini karbida. Istisnuti deo blizu karbida ima visoku koncentraciju napona koja lako inicira prslinu. Slika 2.51c pokazuje da se erozija odvija na mestu sučeljavanja matrice i karbida. Razaranje pod dejstvom kavitacije podkopava karbid, a zatim ga izbacuje iz matrice, kao što je prikazano na sl. 2.51d.

Ovim mehanizmom može se objasniti razaranje pod dejstvom kavitacije metala u kojoj su prisutni i drugi tvrdi konstituenti, uključci (šljaka, gasne pore, nečistoće), poroznost itd.



*A – metalna matrica, B – tvrdi konstituenti ili uključci (šljaka, gasni mehurovi, nečistoće)*

*Slika 2.51. Model mehanizma razaranja metala pod dejstvom kavitacije [140, 141]*

#### 2.4.5. Otpornost materijala na dejstvo kavitacije

Sposobnost materijala da se suprotstavi razaranju usled dejstva kavitacije, naziva se otpornost materijala na dejstvo kavitacije. Za procenu otpornosti materijala na dejstvo kavitacije koriste se laboratorijska ispitivanja, pa je u tu svrhu razrađeno više metoda za laboratorijsko ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije kao što su [142]:

1. Metode strujom velike brzine (Venturijeva cev)
2. Metode udara mlaza koji koriste i stacionarne i rotirajuće uzorke izložene mlazu velike brzine
3. Vibracione metode visoke frekvencije koje obuhvataju magnetostrikcione i ultrazvučne uređaje

Metode navedene pod 1 i 2 primenjuju se za laboratorijsko ispitivanje strujne kavitacije a metode pod 3 za laboratorijsko ispitivanje talasne kavitacije [143-149].



Najčešći standardi za ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije, zavisno od primenjene metode ispitivanja, su ASTM G32 [150] i G134 [151].

U ovom radu, za definisanje brzine erozije i otpornosti OM i SZUT čelika NN-70, korišćena je ultrazvučna vibraciona metoda i standard ASTM G32 [150].

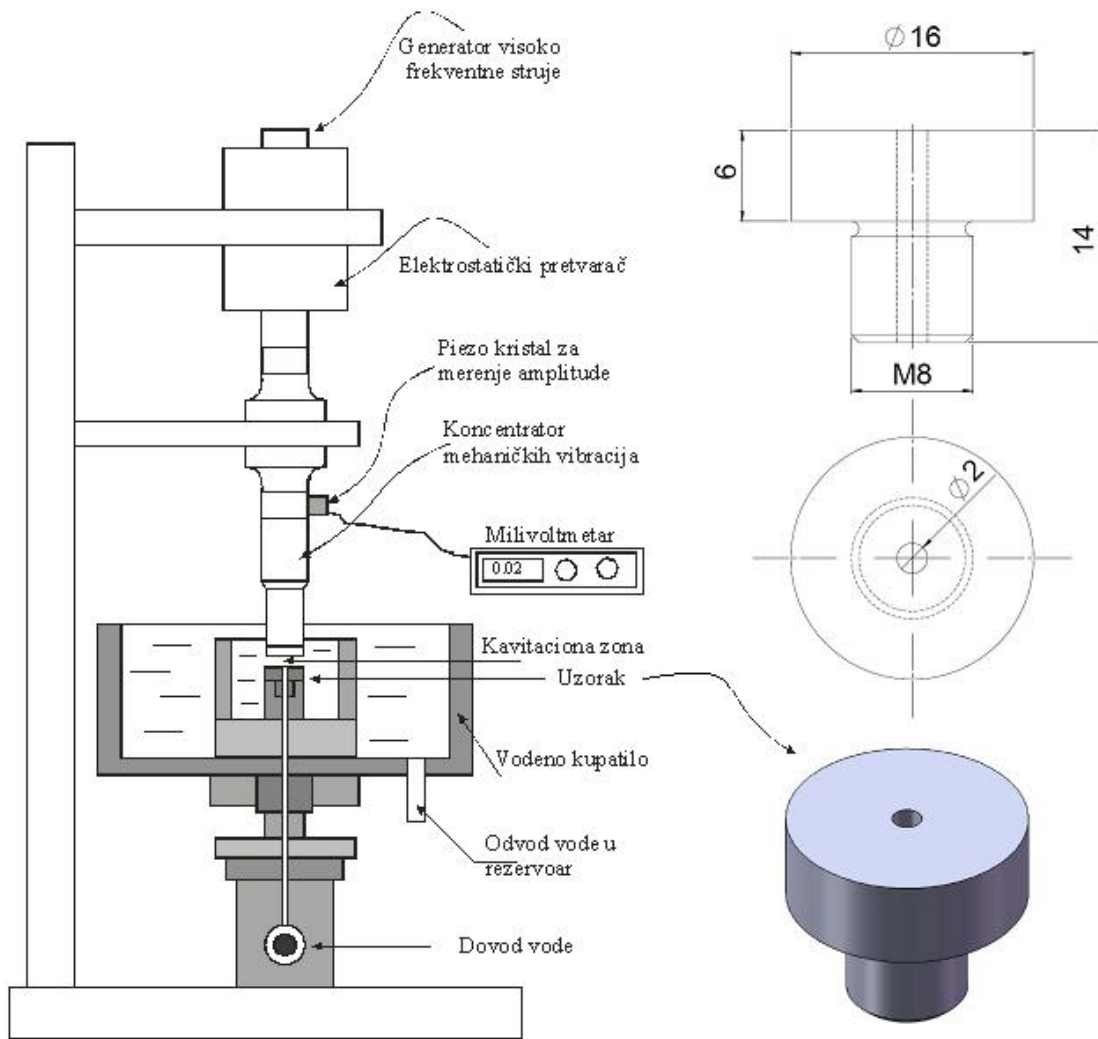
#### *2.4.5.1. Ultrazvučna vibraciona metoda*

Jedna od laboratorijskih metoda za ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije je ultrazvučna vibraciona metoda. Ova metoda zasnovana je na stvaranju i imploziji kavitacionih mehura na površini uzorka. Uslovi i procedura ispitivanja, priprema uzoraka kao i interpretacija rezultata definisani su standardom ASTM G32 [150]. Primenom ultrazvučne vibracione metode u toku ispitivanja meri se gubitak mase uzorka u određenim vremenskim intervalima a kavitaciona otpornost se definiše preko inkubacionog perioda i kavitacione brzine. Standard, ASTM G32 [150], u zavisnosti od položaja uzorka u toku ispitivanja, daje dve opcije a to su : ultrazvučna metoda sa vibracionim uzorkom i ultrazvučna metoda sa stacionarnim uzorkom. Kod metode sa vibracionim uzorkom, uzorak je preko navoja postavljen na vrhu koncentratora mehaničkih vibracija. U slučaju metode sa stacionarnim uzorkom, uzorak je postavljen u vodenom kupatilu ispod koncentratora mehaničkih vibracija na određenoj udaljenosti. Prednost metode sa stacionarnim uzorkom je što uzorak u toku ispitivanja nije izložen mehaničkim naprezanjima kao i u mogućnosti ispitivanja uzoraka od krutih materijala kod kojih se ne može narezivati navoj.

Shema uređaja za ispitivanje ultrazvučnom vibracionom metodom sa stacionarnim uzorkom, prikazana je na sl. 2.42.

Generator visokofrekventne struje izlazne snage 360 W, generiše struju frekvencije 20÷50 kHz koja se održava konstantnom sve vreme ispitivanja. Strujom visoke frekvencije napaja se elektrostrikcioni pretvarač - konvektor u kome se preko piezo-električnog elementa (cirkonijum-titanat) struja visoke frekvencije pretvara u mehaničke vibracije.

Amplituda ovih vibracija se pomoću koncentratora, kruto vezanog za pretvarač, povećava u odnosu 1:8. Koncentrator prečnika  $\phi 16\text{mm}$ , svojim donjim krajem uronjen je u vodeno kupatilo.



Slika 2.52. Shema uređaja za ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije ultrazvučnom vibracionom metodom sa stacionarnim uzorkom [130,136,150]

Ispod čelone površine koncentratora i stacionarnog probnog uzorka, obrazuje se jaka kavitaciona zona. Voda se dovodi pumpom kroz otvor na uzorku u vodeno kupatilo i tako hladi uzorak i održava njegovu temperaturu konstantnom a ujedno svojim stalnim protokom stvara polje pritiska koje podstiče imploziju kavitacionih mehura na površini ispitivanog uzorka. Na ovaj način probni uzorak nije izložen mehaničkim naprezanjima u toku ispitivanja.

Kod ove metode uzorak materijala koji se ispituje ima otvor  $\phi 2\text{mm}$  kroz koji struji tečnost a uzorak je postavljen ispod čelone površine koncentratora vibracija sa zazorom. Oblik i dimenzije uzorka propisane su standardom [150], a prikan je na sl. 2.52.

Kod ove metode, razaranje materijala pod dejstvom kavitacije zavisi od veličine amplitude, zazora između uzorka i čeone površine koncentratora, protoka vode kroz otvor na uzorku i temperature vode u vodenom kupatilu. Da bi se utvrdile standardne vrednosti gore navedenih parametara ispitivanja, urađena su ispitivanja kavitacione brzine u zavisnosti od navedenih parametara. Na osnovu ovih ispitivanja uticaja pojedinih parametara na kavitacionu brzinu, usvojene su standardne vrednosti navedenih parametara, sa ciljem da bi se rezultati istraživanja mogli upoređivati:

1. Frekvencija mehaničkih vibracija  $20 \pm 0,2$  kHz;
2. Amplituda mehaničkih vibracija na vrhu koncentratora 50  $\mu\text{m}$ ;
3. Zazor između probnog uzorka i koncentratora 0,5 mm;
4. Protok vode 5-10 ml/s;
5. Temperatura vode u kupatilu  $25 \pm 1$  °C.

S obzirom da se kod laboratorijskih ispitivanja otpornosti materijala na dejstvo kavitacije meri gubitak mase u toku ispitivanja, kao mera procene otpornosti materijala na dejstvo kavitacije definiše se kavitaciona brzina:

$$V \text{ (mg/h)} = \Delta m / \Delta t \quad (2.26)$$

gde je:

$\Delta m$  - ukupan gubitak mase u miligramima,

$\Delta t$  - ukupan vremenski interval ispitivanja u satima ili minutima.

Za definisanje kavitacione brzine potrebno je nacrtati dijagram *vreme ispitivanja – gubitak mase*. Gubitak mase nastale dejstvom kavitacije nanosi se na ordinatnu osu, a vremenski intervali prikazuju se na apscisi. Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimiraju se pravom linijom. Nagib prave linije predstavlja kavitacionu brzinu materijala.

## Poglavlje 3

### 3. EKSPERIMENTALNI DEO

Kada je posuda pod pritiskom izrađena zavarivanjem od čelika povišene čvrstoće (HSLA) u cilju ostvarenja što manje mase i povećanja nosivosti, naročito je važno da zavareni spoj, kao najslabije mesto sa svojim konstituentima (ZUT i MŠ), bude sposoban da izdrži složena promenljiva opterećenja. Pri tome je važno da takav materijal, ako radi u uslovima dejstva kavitacije (npr. podmornice ili elementi hidrosistema) ima veliku otpornost na dejstvo kavitacije.

#### 3.1 Materijal

Osnovni materijal (OM) koji je poslužio za izradu epruveta za eksperiment ove doktorske disertacije je ploča (45x205x353 mm) od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće, Nionikral 70 (NN-70) [13], namenjenog za brodske konstrukcije, podmornice i sudove pod pritiskom. Izrađen je u elektropeći, odliven u brame, prevaljan u slabove a potom u lim različitih debljina.

Po nekim svojim osobinama spada u grupu fino-zrnastih čelika. Postupak ojačavanja je kombinacija klasičnog poboljšanja (kaljenja i otpuštanja) uz usitnjavanje zrna podesno izabranim hemijskim sastavom, mikrolegiranjem i odgovarajućim taloženjem [71].

Ispitani čelik sadrži procentualno sledeće elemente: C 0,106%, Si 0,209%, Mn 0,220%, P 0,005%, S 0,0172%, Cr 1,2575%, Ni 2,361%, Mo 0,305%, V 0,052%, Sn 0,014%, Cu 0,246%, Ti, 0,002%, Nb 0,007%, Co 0,0189%.

### 3.2. Cilj eksperimenta

Cilj eksperimenta je da se, u odsustvu pouzdanih teorija o zamaranju i kavitaciji, pogodnim metodama ispitivanja u laboratorijskim uslovima na odgovarajućim uzorcima dođe do rezultata koji su posredno ili neposredno primenljivi u proračunima i da se dobijeni rezultati eventualno iskoriste i za fundamentalna proučavanja tokova procesa zamaranja i kavitacije.

### 3.3. Priprema za glavna ispitivanja

U cilju obavljanja glavnih ispitivanja, **ispitivanja niskocikličnim zamorom (NCZ) i ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije (ONK)**, na odabranom uzorku, ploči, od čelika NN-70 izvršena su odgovarajuće pripreme, a specifikacija pripremnih aktivnosti data je u tabeli 3.1A.

U tabeli 3.1B data je specifikacija glavnih eksperimentalnih ispitivanja, koji čine jezgro ove disertacije.

*Tabela 3.1A. Specifikacija aktivnosti koje su prethodile ispitivanju NCZ i ONK*

R.br.	Vrsta ispitivanja	Svrha ispitivanja	Standard/Softver	Napomena
1.	Vizuelno dimenziona kontrola uzorka i prateće dokumentacije	Utvrđivanje porekla, stanja, oblika, dimenzija, oštećenja...	SRPS EN 13018:2008 [163]	Prilog 1, Ploča 1
2.	Ispitivanje površine uzorka magnetnim česticama u obimu 100%	Utvrđivanje površinskih grešaka materijala uzorka	SRPS EN ISO 9934-1:2008 [164]	Prilog 2, Ploča 1
3.	Ispitivanje homogenosti materijala ultrazvukom u obimu 100%	Utvrđivanje zapreminskih grešaka materijala uzorka (homogenosti)	SRPS EN 583-1:2007 [165] SRPS EN 14127:2008 [166] SRPS EN 10160:2010 [167]	Prilog 3, Ploča 1
4.	Merenje tvrdoće na površinama uzorka, HV30	Utvrđivanje približnih mehaničkih karakteristika materijala	SRPS C.A4.030:1986 [168]	Prilog 4, Ploča 1
5.	Algoritmi ispitivanja	Izrada plana uzimanja epruveta i ispitivanja NCZ, simulacije zone uticaja toplote (SZUT) i ONK. Izrada skice i 3D modela uzorka	SolidWorks [169]	Algoritmi ispitivanja (NCZ, SZUT, ONK), Sl. 3.1, 3.2 i 3.3, Ploča 1
6.	Ispitivanje hemijskog sastava materijala	Utvrđivanje hemijskog sastava materijala uzorka	Hemijski sastav urađen u Železari-Smederevo.	Prilog 5, Ploča 1, Sl. 3.1, Šarža 1
7.	Ispitivanje zatezanjem	Određivanje zatezних karakteristika materijala	SRPS EN ISO 6892-1 [116], identičan sa EN 10002-1 [170]	Prilog. 6 i 7 Ploča 1, Sl. 3.1, 3.3 i 3.5, Šarža 1
8.	Ispitivanje udarom	Izbor režima simulacije (za SZUT). Određivanje temperature nulte plastičnosti materijala (za OM i SZUT). Poređenja temperatura nulte plastičnosti (OM, ZS, RZUT, SZUT).	SRPS EN 10045-1 [171], SRPS EN ISO 148-1 [172], ASTM E23 [173] ASTM E 208 [174]	Prilozi 8 do 12, Ploča 1, Šarža 1, 4 do7

*Tabela 3.1B. Specifikacija glavnih eksperimentalnih ispitivanja*

R.br.	Vrsta ispitivanja	Svrha ispitivanja	Standard/Softver	Napomena
1.	Ispitivanje NCZ	Određivanje zamornih karakteristika materijala	ISO 12106 [96], ASTM E 606 [95], BSI 7608 [175], ASTM E 111 [114]	Sl. 3.3, 3.5 Prilozi 13 do 20, Ploča 1, Šarža 1
2.	Ispitivanje ONK	Određivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije i mehanizma nastanka razaranja pod dejstvom kavitacije.	ASTM G 32 <sup>2</sup> [150], SRPS EN 60609-1 [176], SRPS EN 60609-2 [177]	Sl. 3.1, 3.6 Prilog 21, Ploča 1, Šarža 1

### 3.3.1. Algoritam ispitivanja čelika niskocikličnim zamorom

#### **Definisanje cilja ispitivanja:**

Poređenje ponašanja osnovnog materijala (OM) i simulirane zone uticaja toplote (SZUT) u uslovima niskocikličnog zamora na osnovu:

Ciklične naponsko deformacione krive (Ramberg-Ozgdud) i

Krive deformacija-vek (Manson-Kofin).

#### **Potrebna prethodna ispitivanja:**

Ispitivanje hemijskog sastava čelika;

Ispitivanje mehaničkih osobina čelika (određivanje modula elastičnosti);

Određivanje energije udara na epruvetama OM (žilavost na različitim temperaturama);

Određivanje energije udara na epruvetama SZUT-a, (žilavost na različitim temperaturama);

Ispitivanje strukturnih osobina čelika (metalografija).

#### **Izrada plana ispitivanja:**

Izbor standarda za ispitivanje (ISO 12106/03, ASTM E 606/04, BSI 7608/93...);

Izbor kidalice na kojoj će se ispitivati (MTS sistem, Univerzalna hidraulična dinamička kidalica od 500 kN, model 641.37A-01);

Izbor držača epruveta i prateće opreme kod ispitivanja (ekstenzometar merne dužine 25 mm);

Izbor režima ispitivanja (kontrolisana deformacija, sobna temperatura, faktor asimetrije -1 definisan sinusnom funkcijom, amplitudnih nivoi deformacije 0.2, 0.4, 0.6, 0.8...);

Definisanje izgleda i dimenzija epruvete (okrugla glatka epruveta, Ø7/M10/25/90);

Određivanje potrebnog broja epruveta za ispitivanje (OM-10 kom, SZUT-10 kom);

Izrada tehnološkog postupka vađenja i mašinske obrade epruveta ();

Eventualna izrada nosača-držača epruveta za ispitivanje ().

#### **Određivanje dimenzija potrebnog uzorka**

## **Određivanje pravca valjanja na velikom uzorku čelika poznatog hemijskog sastava i mehaničkih osobina**

### **Uzorkovanje**

### **Peskarenje uzorka**

### **IBR ispitivanje i ispitivanje tvrdoće na uzorku**

#### **Potrebne prethodne pripreme:**

Izbor uređaja na kome će se obaviti simulacija (Thermal Cycle Simulator Tensile Test Unit – SmithWeld, model 1405);

Izbor režima simulacije (frekvencija, amplituda, temperature vode, zazor između talasovoda i ispitivanog uzorka materijala...);

Definisanje izgleda i dimenzija epruvete (11x11x60);

Određivanje potrebnog broja epruveta za ispitivanje (3x4=12 kom);

Izrada tehnološkog postupka vađenja i mašinske obrade epruveta (prema skici);

Simulacija ZUT-a za različita vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}=8, 10, 20$  i  $40$  s, na pripremcima za izradu epruveta za ispitivanje žilavosti;

Merenje tvrdoće HV10 na uzorku simuliranog ZUT-a;

Utvrđivanje strukture SZUT-a;

Utvrđivanje žilavosti SZUT-a koja približno odgovara žilavosti realnog ZUT-a;

Simulacija ZUT-a za odgovarajuće vreme hlađenja  $\Delta t_{8/5}=40$  s na pripremcima za izradu epruveta za ispitivanje žilavosti i LCF.

#### **Izrada epruveta za ispitivanje**

##### **Ispitivanje:**

LCF (VTI, ispitivanje do kidanja epruveta, fotografisanje i snimanje rezultata);

Analiza prelomnih površina (SEM, spektralna analiza...).

##### **Obrada rezultata ispitivanja:**

Izbor načina prikazivanja rezultata ispitivanja (tabele, grafikoni...);

Izbor programa za obradu rezultata (EXCEL);

Izbor načina poređenja dobijenih rezultata;

Izrada krive ekstremnih vrednosti napona (filtriranje podataka dobijenih sa kidalice...);

Određivanje broja ciklusa do iniciranja prsline,  $N_f$  (prema standardu ISO 12106/03, ASTM E 606/04, BSI 7608/93..., prema literaturi, prema pragu NDT);



Određivanje stabilizovane histereze, njenih poluraspona deformacija, minimalne i maksimalne vrednosti napona (očitavanje deformacija analitički u EXCEL-u ili grafički u SolidWorksu i napona sa histereze);

Određivanje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti (ASTM E 111/04, ASTM E 606/04,...);

Određivanje ciklične i naponsko deformacione krive (određivanje koeficijenata, jednačine i crtanje krive...);

Konstruisanje krive deformacija-vek (linearizovana elastična i plastična komponenta krive i ukupna kriva...);

Morfologija loma (čitanje SEM fotografija površina polomljenih uzoraka).

#### **Analiza i zaključci:**

Ocena cikličnog ponašanja čelika;

Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive (Ramberg-Ozgodova relacija);

Izračunavanje prelaznog veka (Manson-Kofinova relacija);

Ocena površine preloma.

### 3.3.2. Algoritam ispitivanja otpornosti čelika na dejstvo kavitacije

#### **Definisanje cilja ispitivanja:**

Poređenje ponašanja OM i SZUT u uslovima delovanja kavitacije;

Određivanje morfologije kavitacionog oštećenja;

Određivanje gubitka mase u funkciji vremena delovanja kavitacije.

#### **Izbor čelika za ispitivanje:**

Niskolegirani čelik povišene čvrstoće (HSLA), Nionikral 70, (NN-70).

#### **Potrebna prethodna ispitivanja:**

Ispitivanje strukturnih osobina OM i SZUT-a (metalografija).

#### **Izrada plana ispitivanja:**

Izbor standarda za ispitivanje (ASTM G 32<sup>2</sup>, SRPS EN 60609-1:2009, SRPS EN 60609-2:2009...);

Izbor metode za laboratorijsko ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije (ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom);

Primenjeni pristup istraživanja (analiza makroskopskih parametara - praćenje brzine razaranja uzoraka pod dejstvom kavitacije i merenje hrapavosti površina profilometrom i analiza mikroskopskih parametara - snimanje oštećenih površina skening-elektronskim mikroskopom (SEM), i korišćenje optičkog mikroskopa za kvantifikovanje dubine oštećenja i uočavanje eventualnih strukturnih promena u potpovršinskom sloju. Na poprečnom preseku ispitivanih uzoraka merenje mikrotvrdoće (HV) radi utvrđivanja deformativno ojačanog potpovršinskog sloja.);

Izbor uređaja na kome će se obaviti ispitivanje (Uređaj za ispitivanje kavitacione otpornosti ultrazvučnom vibracionom metodom sa stacionarnim uzorkom);

Izbor držača epruveta i prateće opreme kod ispitivanja ();

Izbor režima ispitivanja (frekvencija, amplituda, temperature vode, zazor između talasovoda i ispitivanog uzorka materijala...);

Definisanje izgleda i dimenzija epruvete (iz SZUT epruvete za ispitivanje NCZ prema skici...);

Određivanje potrebnog broja epruveta za ispitivanje (1OM+1SZUT);

Izrada tehnološkog postupka vađenja i mašinske obrade epruveta (prema skici);

Eventualna izrada nosača-držača epruveta pri ispitivanju (držač – modifikovana standardna epruveta).

### **Ispitivanje**

#### **Obrada rezultata ispitivanja:**

Izbor načina prikazivanja rezultata ispitivanja (fotografije, tabele, grafikoni...);

Izbor programa za obradu rezultata (EXCEL);

Izbor načina poređenja dobijenih rezultata;

Konstruisanje krive gubitka mase u funkciji vremena izloženosti kavitaciji.

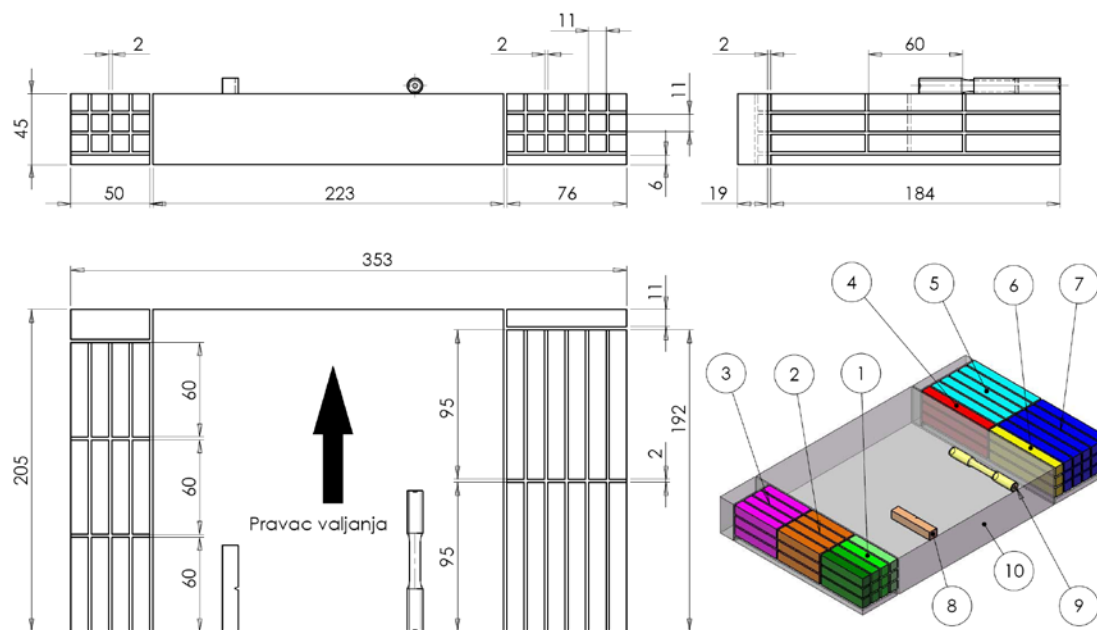
#### **Analiza i zaključci:**

Ocena otpornosti OM i SZUT čelika na dejstvo kavitacije;

Poređenje otpornosti OM i SZUT čelika na dejstvo kavitacije.

### 3.3.3. Izrada modela uzorka i plana sečenja epruveta

Na sl. 3.1 prikazan je 3D model uzorka sa rasporedom priprema za izradu epruveta za ispitivanje udarom, sl. 3.2, i ispitivanja zatezanjem i LCF, sl. 3.3 i 3.5.

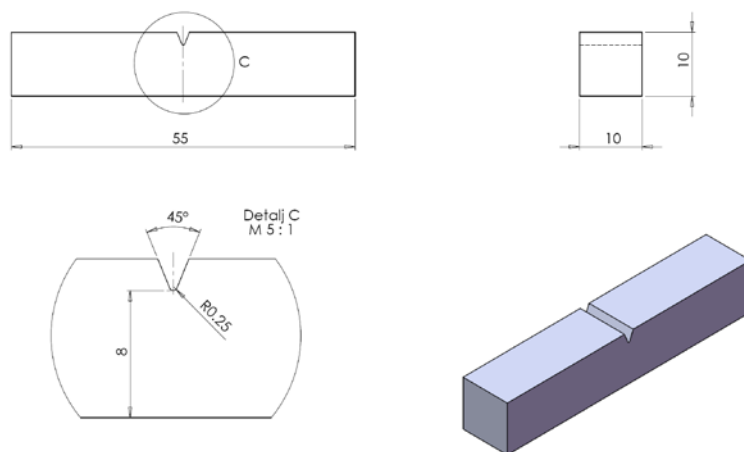


Slika 3.1. 3D model ploče 1 i raspored priprema za izradu epruveta

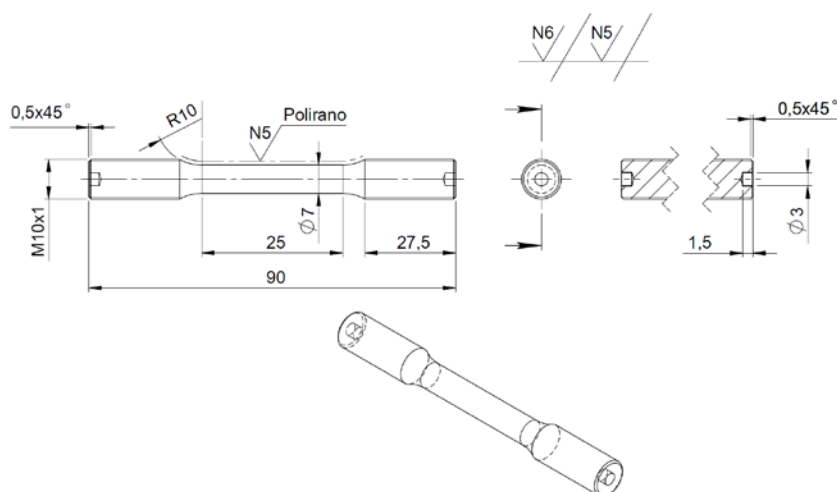
Na sl. 3.1 pozicije 1 do 10 predstavljaju:

- 1 - uzorci za simulaciju ZUT-a (izbor režima simulacije) za različita vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}=8, 10, 20$  i  $40$  s. ( $3 \times 4=12$  kom) i izradu epruveta, (8), za određivanje energije udara koja približno odgovara žilavosti realnog ZUT-a.;
- 2 - uzorci za simulacija ZUT-a (usvojeni režim simulacije) i izradu epruveta, (8), za određivanje energije udara SZUT-a na različitim temperaturama (12 kom) (određivanje temperature nulte plastičnosti SZUT-a);
- 3 - uzorci za izradu epruveta, (8), za određivanje energije udara na epruvetama OM na različitim temperaturama ispitivanja (12 kom) (određivanje temperature nulte plastičnosti OM);
- 4 - uzorci za simulacija ZUT-a (usvojeni režim simulacije) i izradu epruveta, (9), za ispitivanja zatezanjem (3 kom) (određivanje zateznih karakteristika SZUT-a);

- 5 - uzorci za simulacija ZUT-a (usvojen režim simulacije) i izradu epruveta, (9), za ispitivanja niskocikličnim zamorom – LCF (15 kom) (određivanje zamornih karakteristika SZUT-a);
- 6 - uzorci za izradu epruveta, (9), za ispitivanja zatezanjem OM (3 kom) (određivanje zateznih karakteristika OM);
- 7 - uzorci za izradu epruveta, (9), za ispitivanja niskocikličnim zamorom – LCF (15 kom) (određivanje zamornih karakteristika OM);
- 8 - izgled i orijentacija zarez na epruveti za ispitivanje udarom, sl. 3. 2;
- 9 - izgled epruvete za ispitivanja OM zatezanjem i LCF, sl. 3.3;
- 10 - ostatak materijala od koga je uzet uzorak za ispitivanje hemijskog sastava.



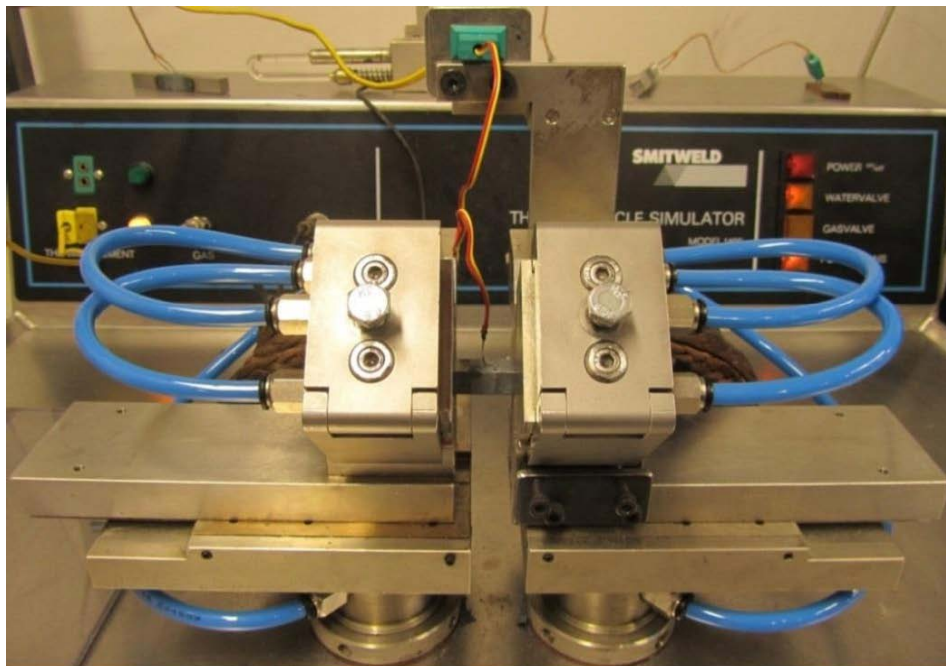
Slika 3.2. Epruveta za ispitivanje udarom na instrumentiranom klatnu sa osciloskopom Schenck Trebel, energije udara 150-300 J [172]



Slika 3.3. Epruveta za ispitivanje OM zatezanjem i LCF

### 3.4 Simulacija zone uticaja toplote na uzorcima od čelika NN-70

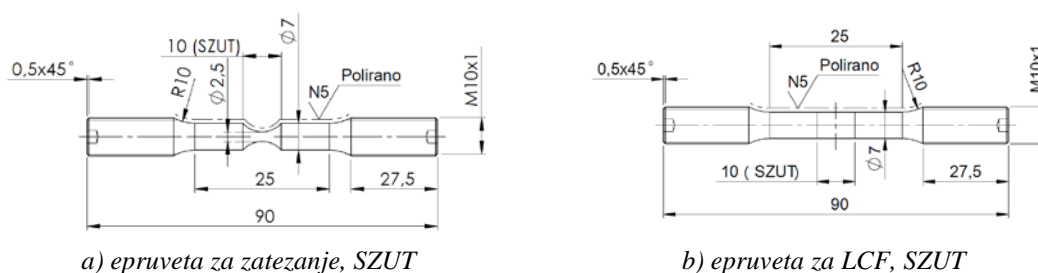
Mikrostruktura ZUT čelika NN-70, za potrebe udarnih (izbor režima simulacije i određivanje prelazne temperature za odabrani režim simulacije) i zamornih ispitivanja (za odabrani režim simulacije), simulirana je na simulatoru tip SmitWeld (Thermal Cycle Simulator Tensile Test Unit – SmithWeld, model 1405), sl. 3.4.



Slika 3.4. Uređaj koji je korišćen za termičku simulaciju ZUT na uzorcima čelika NN-70

Uzorci dimenzija 11x11x60 mm su izloženi 0.5 s temperaturi austenitizacije od 1300°C, za različita vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 8, 10, 20$  i 40 s radi dobijanje strukture i osobina materijala SZUT koji približno odgovaraju strukturi i osobinama materijala realnog ZUT čelika NN-70, a što je utvrđeno udarnim ispitivanjima, ispitivanjima tvrdoće i strukture materijala (izbor režima simulacije). Tvrdoća je merena na Aparatu za ispitivanje tvrdoće metala po Vickersu, A.J.AMSLER - Švajcarska, a mikrostruktura analizirana na Metalografskom mikroskopu, KARL ZEISS JENA - DDR, sa uvećanjim x5, x50, x100, x200 i x500. Posle odabranog režima simulacije  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, uzorci, dimenzija 11x11x60 mm, izloženi su 0.5 s temperaturi austenitizacije od 1300°C od kojih su izrađene epruvete za ispitivanje udarom radi određivanje prelazne temperature. Takođe, posle odabranog režima simulacije  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, uzorci, dimenzija 11x11x90 mm, izloženi su 0.5 s temperaturi austenitizacije od 1300°C, a od njih su izrađene

okrugle glatke epruvete radi ispitivanja zateznih osobina i NCZ sa ciljem utvrđivanja niskocikličnih zamornih karakteristika, sl. 3.5.



a) epruveta za zatezanje, SZUT

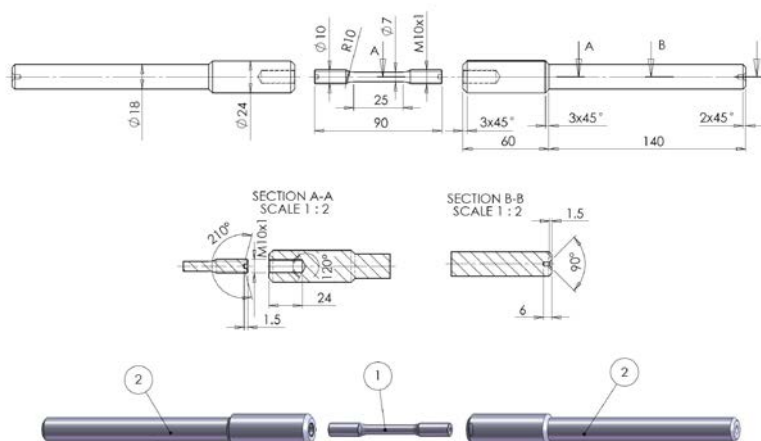
b) epruveta za LCF, SZUT

Slika 3.5. Epruvete za ispitivanje zatezanjem i LCF SZUT

Ispitivanja zatezanjem su urađena na sobnoj temperaturi na univerzalnoj elektromehaničkoj kidalici Schenck Trebel RM100, sa brzinom uvođenja aksijalne sile,  $v=0.385$  kN/s za OM i  $v=0.049$  kN/s za SZUT.

### 3.5. Ispitivanje otpornosti čelika NN-70 na niskociklični zamor

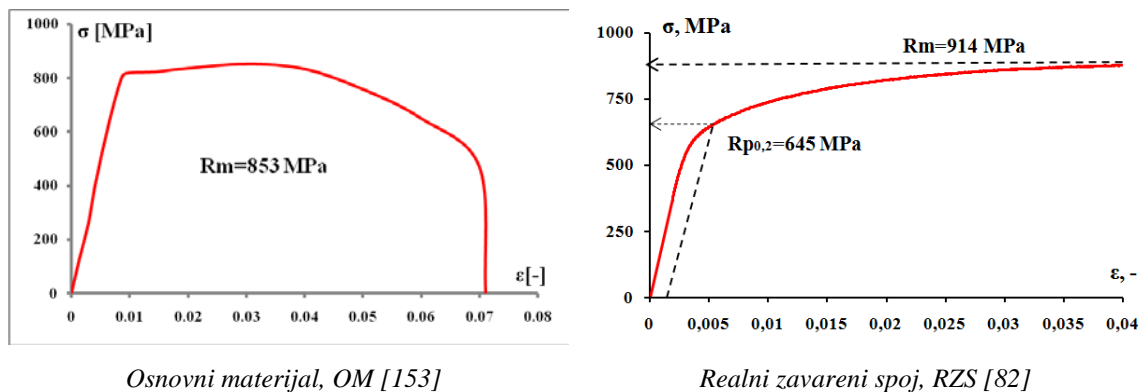
Iz potrebe da se izvrši procena niskocikličnog zamornog veka, u svrhu određivanja zamornih karakteristika materijala, provedeno je ispitivanje otpornosti na niskociklični zamor osnovnog materijala (OM) i simulirane zone uticaja toplote (SZUT) čelika NN-70. Priprema ispitivanja otpornosti na niskociklični zamor čelika NN-70, sastojala se od izrade cilindričnih glatkih epruveta, sl. 3.3 i 3.5b, izrade alata za stavljanje epruvete u čeljusti kidalice, sl. 3.6, i provere ciljnih statičkih zateznih karakteristika čelika NN-70, Prilog 6 i 7 i sl. 3.7.



Poz.1, Epruveta za LCF, NN-70  
Poz. 2, Nosač epruvete, 42CrMo4

Slika 3.6. Epruveta i nosač epruvete za ispitivanje NCZ čelika NN-70

Postupak određivanja karakteristika niskocikličnog zamora, kao i geometrija cilindrične glatke epruvete, sl. 3.3 i 3.5b, definisani su standardima ISO 12106:2003(E) [96] i ASTM E 606-04<sup>e</sup> [95].

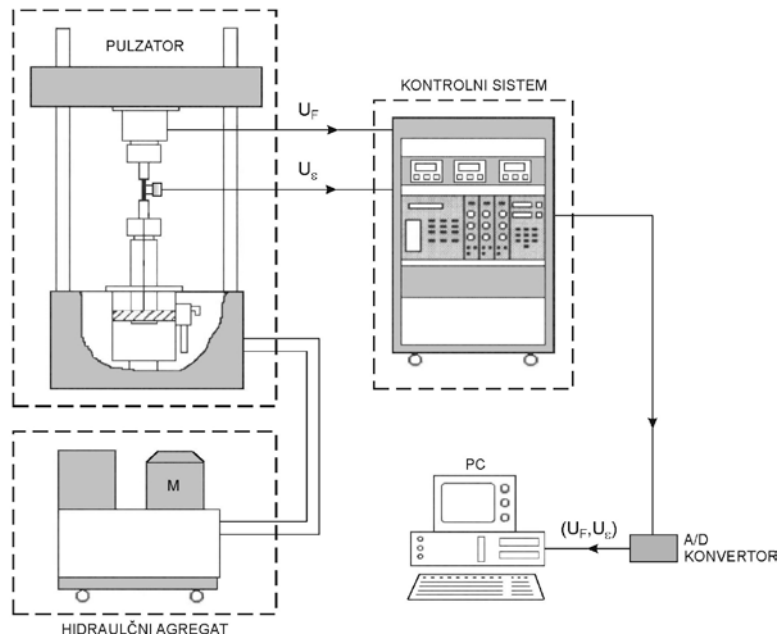


Slika 3.7. Rezultati statičkog ispitivanja zateznih karakteristika OM čelika NN-70

Ispitivanje zamaranjem urađena su na univerzalnom MTS sistemu (Material Testing System – Univerzalna hidraulična dinamička kidalica od 500 kN) za ispitivanje materijala, prikazanom šematski sa fotografijama na sl. 3.8.



Slika 3.8. MTS univerzalni sistem za ispitivanje materijala



Slika 3.8. MTS univerzalni sistem za ispitivanje materijala (nastavak)

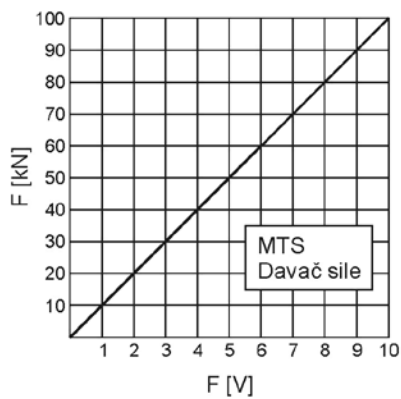
Linearne karakteristike korišćenog MTS davača sile i MTS ekstenzometra merne dužine  $L_0 = 25$  mm, grafički su predstavljene na sl. 3.9.



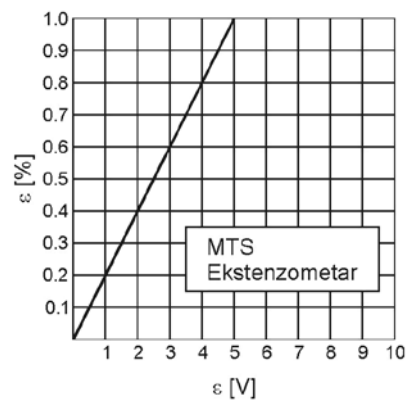
Glava kidalice sa davačem sile



Ekstenzometar



$$F[kN] = F[V] \cdot 10$$



$$\varepsilon[\%] = \varepsilon[V] \cdot 0.2$$

Slika 3.9. Linearne karakteristike MTS davača sile i MTS ekstenzometra



### 3.5.1. Postupak ispitivanja niskocikličnim zamorom

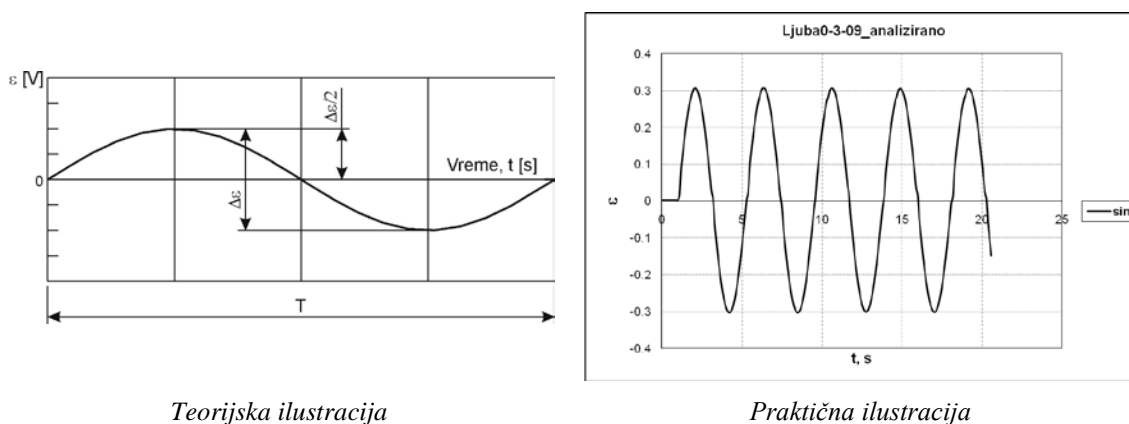
Na glatkim epruvetama sa zarezom, sl. 3.3, urađenim od priprema uzetih iz ploče 1, poz. 5, sl. 3.1 (posle simulacije ZUT za usvojeni režim simulacije u cilju određivanja zamornih karakteristika SZUT) i poz. 7, sl. 3.1 (određivanja zamornih karakteristika OM) čelika NN-70, urađena su zamorna ispitivanja.

Niskociklusnom zamaranju na sobnoj temperaturi, izlagano je 10 epruveta OM označenih sa OM1 do OM10, i 10 epruveta SZUT označenih sa SZUT1 do SZUT10. Primenjen je režim kontrolisanih deformacija sa faktorom asimetrije ciklusa  $R_\varepsilon = -1$  ( $R_\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max} = -1$ ).

Zakon kontrolisanih deformacija definisan je sinusnom trigonometrijskom funkcijom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.1)$$

u kojoj razlikujemo: amplitudu  $\Delta\varepsilon/2$ , vreme  $t$  izraženo u sekundama i period  $T$  takođe izražen u sekundama. Grafička ilustracija zakona kontrolisanih deformacija, analitički definisanog funkcijom (3.1), data je na sl. 3.10.



Slika 3.10. Ilustracija zakona kontrolisanih deformacija

Osnovni podaci o režimima kontrolisanih deformacija za epruvete OM i SZUT dati su u tabelama 3.2 i 3.3. Među njima su i podaci o apsolutnom izduženju  $\Delta l$  merne dužine  $L_0 = 25$  mm.

Tabela 3.2. Osnovni podaci o režimima kontrolisanih deformacija za OM

	1	2	3	4	5	6	7
Epruveta	$\Delta\varepsilon/2$ [%]	$\Delta\varepsilon/2$ [V]	$\Delta\varepsilon/2$ [mm/mm]	$\Delta l$ [mm]	$\Delta\varepsilon$ [%]	T [s]	f [Hz]
	eksperiment	$\varepsilon[\%] = \varepsilon[V] \cdot 0.2$	1/100	3*25	1*2	eksperiment	1/6
OM-09	0.35	1.75	0.0035	0.0875	0.70	4.30	0.2326
OM-01	0.35	1.75	0.0035	0.0875	0.70	3.75	0.2666
OM-10	0.45	2.25	0.0045	0.1125	0.90	4.30	0.2326
OM-02	0.50	2.50	0.0050	0.1250	1.00	4.30	0.2326
OM-03	0.50	2.50	0.0050	0.1250	1.00	4.30	0.2326
OM-06	0.60	3.00	0.0060	0.1500	1.20	4.30	0.2326
OM-07	0.60	3.00	0.0060	0.1500	1.20	4.30	0.2326
OM-04	0.70	3.50	0.0070	0.1750	1.40	4.30	0.2326
OM-05	0.70	3.50	0.0070	0.1750	1.40	4.30	0.2326
OM-08	0.80	4.00	0.0080	0.2000	1.60	4.30	0.2326

Tabela 3.3. Osnovni podaci o režimima kontrolisanih deformacija za SZUT

	1	2	3	4	5	6	7
Epruveta	$\Delta\varepsilon/2$ [%]	$\Delta\varepsilon/2$ [V]	$\Delta\varepsilon/2$ [mm/mm]	$\Delta l$ [mm]	$\Delta\varepsilon$ [%]	T [s]	f [Hz]
	eksperiment	$\varepsilon[\%] = \varepsilon[V] \cdot 0.2$	1/100	3*25	1*2	eksperiment	1/6
SZUT-08	0.40	2.00	0.0040	0.1000	0.80	4.30	0.233
SZUT-09	0.40	2.00	0.0040	0.1000	0.80	4.30	0.233
SZUT-10	0.40	2.00	0.0040	0.1000	0.80	4.30	0.233
SZUT-01	0.50	2.50	0.0050	0.1250	1.00	4.30	0.233
SZUT-06	0.50	2.50	0.0050	0.1250	1.00	4.30	0.233
SZUT-07	0.50	2.50	0.0050	0.1250	1.00	4.30	0.233
SZUT-04	0.60	3.00	0.0060	0.1500	1.20	4.30	0.233
SZUT-05	0.60	3.00	0.0060	0.1500	1.20	4.30	0.233
SZUT-02	0.70	3.50	0.0070	0.1750	1.40	4.30	0.233
SZUT-03	0.70	3.50	0.0070	0.1750	1.40	4.30	0.233

Epruveta iz koje su napravljeni uzorci za ispitivanje otpornosti na kavitaciju (OM i SZUT)

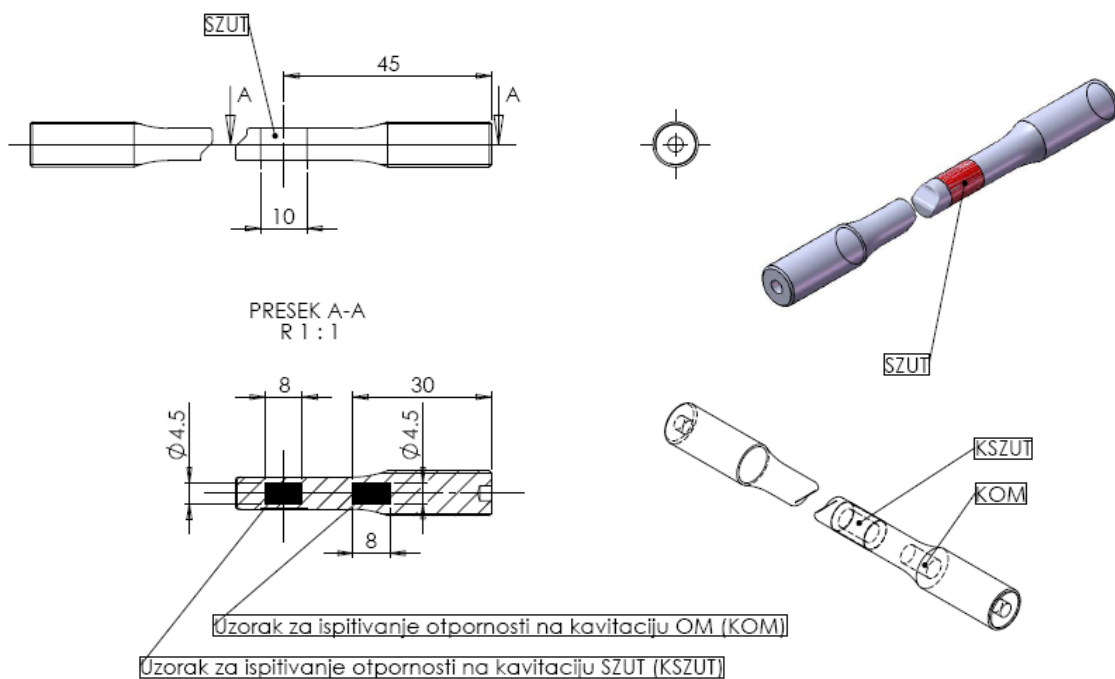
Iz tabela 3.2 i 3.3 se vidi da je ispitivanje otpornosti na niskociklični zamor epruveta OM i SZUT čelika NN-70 izvršeno sa amplitudnim nivoima deformacija  $\Delta\varepsilon/2 = 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70$  i  $0.80$  %, što omogućava ulazne podatke za konstruisanje NCZ krivih. Vrednosti frekvencija  $f$  pridruženih tim nivoima, jednake su recipročnim vrednostima odgovarajućih perioda  $T$  ( $f = 1/T$ ).

U toku ispitivanja, za svaku od epruveta su memorisani podaci ( $U_F, U_\epsilon$ ) parova koji predstavljaju u voltima izražene električne signale za silu  $F$  i deformaciju  $\epsilon$ .

Veza računara sa davačem sile i ekstenzometrom, sl. 3.8, ostvarena je preko A/D (analogno/digitalnog) konvertora i kontrolnog sistema, a kao rezultat imamo izlaznu datoteku u EXCEL-u sa podacima prikazanim kao na sl. 2.33. Dobijeni podaci su analizirani prema algoritmu opisanom u poglavljima 2.3.5 i 3.3.1.

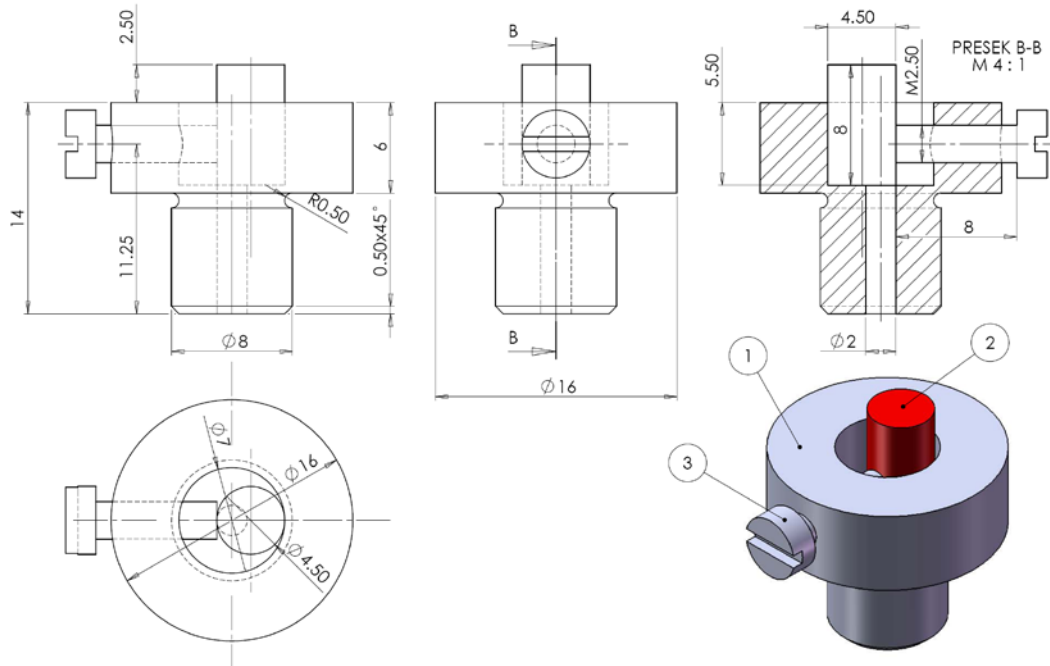
### 3.6. Ispitivanje otpornost čelika NN-70 na dejstvo kavitacije

U ovom radu su posle ispitivanja uzoraka OM i SZUT, čelika NN-70, niskocikličnim zamorom, od polomljene SZUT epruvete izrađeni nestandardni uzorci, sl. 3.11, za ispitivanje otpornosti na kavitaciju ultrazvučnom vibracionom metodom prema standardu ASTM G 32 [150].



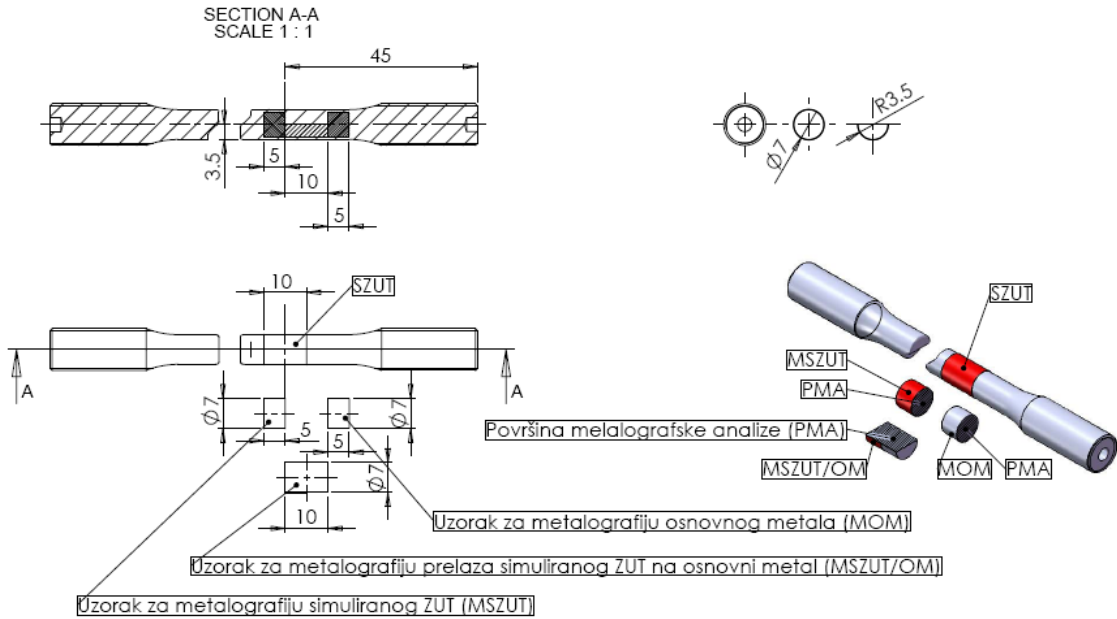
Slika 3.11. Uzorci za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije napravljeni od LCF SZUT epruvete 01

Kao držač ovih uzoraka korišćen je doraden standardni stacionarni uzorak, kao što je prikazano na sl. 3.12. Takođe od polomljenog uzorka SZUT epruvete izrađeni su i uzorci za metalografsko ispitivanje, sl. 3.13, čiji su rezultati poslužili kao osnova za objašnjenje mehanizma razaranja pod dejstvom kavitacije OM i SZUT čelika NN-70.



poz. 1 – držač uzorka, poz. 2 – uzorak za ispitivanje, poz. 3 – zavrtanj za fiksiranje

Slika 3.12. Uzorak za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije u držaču uzorka



Slika 3.13. Uzorci za metalografsko ispitivanje napravljeni od LCF SZUT epruvete 07

Da bi se objasnio mehanizam razaranja pod dejstvom kavitacije u ovom radu, posle ispitivanja uzoraka OM i SZUT čelika NN-70 na dejstvo kavitacije, površine izložene dejstvu kavitacije su posmatrane sken elektronskim mikroskopom (SEM), kao što je to urađeno i u radovima [130,136 i 178-181].

Za laboratorijsko ispitivanje otpornosti materijala NN-70 na dejstvo kavitacije, primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom. Šematski prikaz uređaja za ispitivanje prikazan je na slici 2.52.

Kod ove metode laboratorijska ispitivanja se izvode sa preporučenim standardnim vrednostima parametara, [150], opisanih u poglavlju 2.4.5.1.

Površina ispitivanih uzoraka pripremljena je brušenjem i poliranjem tako da je na svim uzorcima postignut isti kvalitet hrapavosti  $R_a=(0,03-0,05) \mu\text{m}$ .

### 3.6.1. Postupak ispitivanja otpornosti materijala na dejstvo kavitacije

Posle izlaganja svakog uzorka dejstvu kavitacije u trajanju od 30 min, meren je gubitak mase. Masa je merena na analitičkoj vagi, čija je tačnost merenja 0,0001 g. Nakon svakog intervala ispitivanja uzorak je sušen toplim vazduhom i držan u eksikatoru 24 sata kako bi se odstranila zaostala vlaga.

Za definisanje kavitacione brzine, kojom se procenjuje otpornost materijala na dejstvo kavitacije, urađeni su dijagrami vreme ispitivanja-gubitak mase. Gubitak mase nastale razaranjem pod dejstvom kavitacije nanosi se na ordinatu, a na apscisu se upisuju vremenski intervali ispitivanja.

## **Poglavlje 4**

### **4. REZULTATI ISPITIVANJA**

#### **4.1. Rezultati pripremnih aktivnosti**

##### **4.1.1. Vizuelno – dimenziona kontrola**

Na 5 ploča od čelika NN-70 (potvrđeno hemijskom analizom), bez prateće dokumentacije izvršeno je peskarenje i vizuelno dimenziona kontrola (VDK) ploča. U Prilogu 1 prikazani su rezultati VDK ploča od čelika NN-70 [71], poz. 1 do 5. Samo ploča, poz. 1, je upotrebljena za izradu epruveta za eksperiment urađen u ovom doktoratu.

##### **4.1.2. Ispitivanje metodama bez razaranja**

U cilju utvrđivanja eventualnih površinskih i/ili zapreminskih grešaka, koje mogu da utiču na tok ispitivanja NCZ i ONK, na uzorku ploče 1, Priloga 1, izvršena su ispitivanja metodama bez razaranja (IBR). Za utvrđivanje površinskih grešaka, ploča 1 je ispitana metodom magnetnih čestica (MT), a rezultati ispitivanja su dati u Prilogu 2. Za utvrđivanje zapreminskih grešaka, ploča 1 je ispitana ultrazvukom (UT), a rezultati ispitivanja dati su u Prilogu 3.

##### **4.1.3. Merenje tvrdoće ploče**

Na uzorku ploče 1 izvršeno je merenje tvrdoće HV30, a rezultati merenja su prikazani u Prilogu 4.

#### 4.1.4. Ispitivanje hemijskog sastava

Iz ploče 1, poz.10, sl. 3.1, uzet je uzorak za ispitivanje hemijskog sastava, a rezultati su prikazani u tabeli 4.1 i Prilogu 5 kao šarža 1 (45 mm).

Tabela 4.1. Hemijski sastav čelika NN-70, u %, [82, 153]

Šarža	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	As	Sn
1	0.106	0.209	0.220	0.005	0.0172	1.2575	2.361	0.305	0.052	0.007	0.017	0.014
	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>Nb</i>	<i>Ca</i>	<i>B</i>	<i>Pb</i>	<i>W</i>	<i>Sb</i>	<i>Ta</i>	<i>Co</i>	<i>N</i>	-
	0.246	0.002	0.007	0.0003	0	0.0009	0.0109	0.007	0.0009	0.0189	0.0096	-

#### 4.1.5. Ispitivanje zatezanjem

Za potrebe ovog doktorata, iz ploče 1, poz. 6, sl. 3.1, uzeta su tri priprema za izradu epruveta, sl. 3.3, za ispitivanje zatezanjem, a rezultati ispitivanja zatezanjem kao i vrednosti udarne žilavosti i tvrdoće prikazani u tabeli 4.2 i Prilozima 4, 6 kao šarža 1, 7 i 11.

Tabela 4.2. Zatezne karakteristike čelika NN-70, [82, 153]

Šarža	E, GPa	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>p0.2</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	Udarne žilavost, J/cm <sup>2</sup>	Tvrdoća, HV30
1	221.4	853	805	18.4	121	245-269

Zatezne osobine simulirane zone pod uticajem toplote dobijene su ispitivanjem zatezanja glatkih okruglih epruveta izrađenih od simuliranih uzoraka kao što je prikazano na sl. 3.5a. Najuži prečnik epruvete, Ø 2,5 mm, sl. 3.5a napravljen je u središnjem delu simuliranog uzorka širine 10 mm. Rezultati ispitivanja zatezanjem i vrednosti udarne žilavosti i tvrdoće su dati u tabeli 4.3 i Prilozima 10 i 11.

Tabela 4.3. Zatezne karakteristike SZUT čelika NN-70

Šarža	E, GPa	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>p0.2</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	Energija udara, J/cm <sup>2</sup>	Tvrdoća, HV10
1	225.0	884	830	8.7	79	270-280

#### 4.1.6. Ispitivanje udarom

Urađena su udarna ispitivanja na epruvetama sa zarezom, sl. 3.2, urađenim od priprema uzetih iz ploče 1, sl.3.1, poz. 1 (za izbor režima simulacije ZUT), poz. 2 (za usvojeni režim simulacije u cilju određivanja temperature nulte plastičnosti SZUT) i poz. 3 (određivanja temperature nulte plastičnosti OM) čelika NN-70. Ispitivanjima su određene ukupne energije udara (preračunate u Udarnu žilavost, tabele 4.2 i 4.3.), kao i njene komponente, energije stvaranja i širenja prsline.

##### *4.1.6.1. Ispitivanje udarom u cilju izbora režima simulacije ZUT*

Na uzorcima za simulaciju ZUT, 11x11x60 mm na simulatoru SMITHWLED Thermal Cycle Simulator, izvršena je simulacija ZUT za različita vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 8, 10, 20$  i 40 s, prema režimima simulacije datim u Prilogu 8, sa ciljem izbora režima simulacije ZUT koji najpribližnije odgovara realnom ZUT (RZUT).

Za izbor režima simulacije ustanovljen je pokazatelj, najpribližnije sličnosti simuliranog i realnog ZUT, preko rezultata ispitivanja mikrostrukture površine i tvrdoće, HV10, na mestu simulacije i udarnih ispitivanja nakon izrade epruveta, sl. 3.2, od simuliranih uzoraka, Prilog 9.

Za SZUT i dalja ispitivanja, odnosno ispitivanja udarom u cilju određivanja prelazne temperature krtosti (PTK), LCF i ONK izabrano je vreme hlađenja,  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, jer približno odgovara vremenu hlađenja,  $\Delta t_{8/5}$ , RZUT.

##### *4.1.6.2. Ispitivanje udarom u cilju određivanja PTK OM i SZUT*

U ovom eksperimentu je u cilju određivanja prelazne temperature krtosti (PTK) kao značajnog parametra koji se dobija udarnim ispitivanjima pri različitim temperaturama, korišćen kriterijum 27 J. To je ona temperatura pri kojoj ukupna energija udara iznosi 27 J. Treba pomenuti da je ovaj kriterijum danas jedan od najzastupljenijih u određivanju prelazne temperature.



Za usvojeni režim simulacije,  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, u cilju određivanja prelazne temperature krtosti SZUT, izrađene su epruvete za udarna ispitivanja, sl. 3.2, od priprema uzetih iz ploče 1, sl.3.1, poz. 2 (13 kom), nakon izvršene simulacije. Za određivanja prelazne temperature krtosti OM čelika NN-70, epruvete za udarna ispitivanja, sl. 3.2, izrađene su iz ploče 1, sl.3.1, poz. 3 (11 kom).

U tabelama P11.1 do P11.5, Priloga 11, prikazani su rezultati ispitivanja epruveta, OM i SZUT, udarom sa ciljem određivanja prelazne temperature krtosti. Na sl. P11.1, Priloga 11, prikazani su uporedni dijagrami promene ukupne energije udara i energija stvaranja i širenja prsline kod ispitivanja udarom epruveta OM i SZUT. Na sl. P.11.2, Priloga 11, prikazani su dijagrami promene procenta žilavog loma za OM i SZUT u zavisnosti od temperature ispitivanja.

Na sl. P.11.3, Priloga 11 prikazani su karakteristični dijagrami ispitivanja epruveta udarom za razne temperature ispitivanja, OM, a na sl. P.11.4, Priloga 11, SZUT.

U tabelama P11.6 do P11.10, Priloga 11, prikazani su rezultati ispitivanja epruveta zavarenog spoja (ZS) [82], MŠ i RZUT, udarom sa ciljem poređenja sa rezultatima ispitivanja OM i SZUT. Na sl. P11.5, Priloga 11, prikazani su uporedni dijagrami promene ukupne energije udara i energija stvaranja i širenja prsline kod ispitivanja udarom epruveta ZS, MŠ i RZUT. Na sl. P11.6, Priloga 11, prikazani su dijagrami promene procenta žilavog loma za MŠ i RZUT u zavisnosti od temperature ispitivanja.

Na sl. P11.7, Priloga 11, prikazani su karakteristični dijagrami ispitivanja epruveta udarom za razne temperature ispitivanja, MŠ i RZUT, a na sl. P11.8, Priloga 11, poređenje rezultata ispitivanja udarom MŠ i RZUT.

Na sl. P11.9, Priloga 11, prikazani su dijagrami poređenja energija udara, OM i ZS, iz raznih izvora [13] i [82].

Slika P11.10 i P11.11, Priloga 11, prikazuje poređenje dijagrama promene sile i energije udara, OM i SZUT i MŠ i RZUT [82], za temperaturu ispitivanja od 20°C i -40°C, čelika NN-70.

Slika P11.12, Priloga 11, prikazuje poređenje dijagrama promene % žilavog loma sa temperaturom ispitivanja, OM i SZUT i MŠ i RZUT [82].

Slika P12.1, Priloga 12, prikazuje primere određivanja prelazne temperature nulte plastičnosti (TNP), metodom padajućeg tega [174], zavareni spoj, šarža 5 [13] i metodom 27 J, zavareni spoj, šarža 1 [82].

Na sl. P12.2, P12.3 i P12.4, Priloga 12, posle uspostavljanja polinomske zavisnosti promene energije udara i temperature ispitivanja, korišćenjem kriterijuma 27 J, prikazano je određivanje temperatura nulte plastičnosti za OM (šarža 4 do 7), sl. P12.2, MŠ, RZUT (šarža 4 do 7), sl. P12.3 i OM i SZUT, sl. P12.4, Priloga 12.

U tabeli P12.1, Priloga 12 prikazani su rezultati TNP, određeni metodom padajućeg tega [13,174] i metodom 27 J [82], za čelik NN-70, OM, ZS, MŠ, RZUT i SZUT.

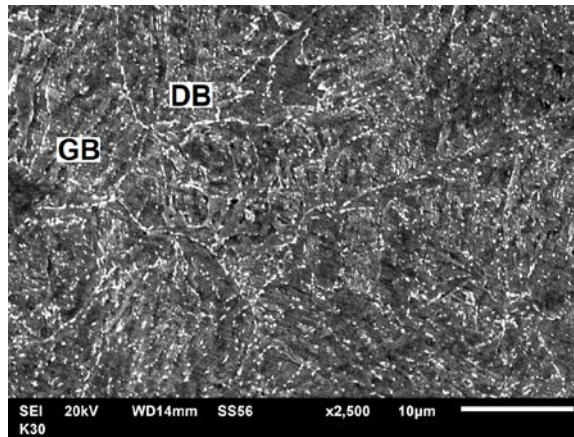
## 4.2. Rezultati ispitivanja niskocikličnim zamorom

### 4.2.1. Rezultati merenja epruveta posle ispitivanja NCZ

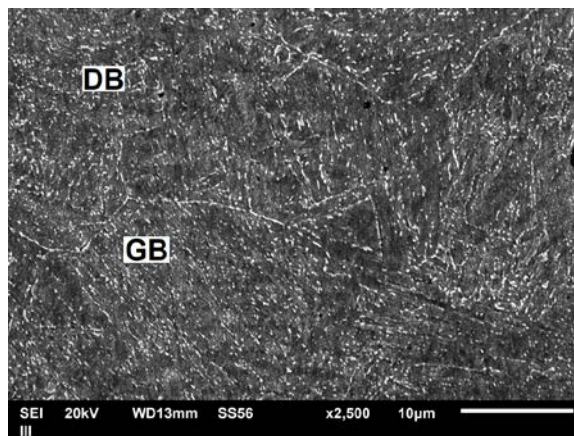
U Prilogu 13 dati su rezultati merenja polomljenih epruveta, OM i SZUT, čelika NN70, posle ispitivanja niskocikličnim zamorom (NCZ).

### 4.2.2. Mikrostrukture i prelomne površine epruveta posle ispitivanja NCZ

Mikrostrukture OM i SZUT, dobijene na SEM, prikazane su na slici 4.1 i 4.2. U mikrostrukтури osnovnog materijala i ZUT-a prisutni su donji i gornji beinit. Sadržaj donjeg beinita je veći u osnovnom metalu nego u ZUT-u. U osnovnom materijalu je austenitno zrno bilo manje, pa je i sadržaj donjeg beinita veći.

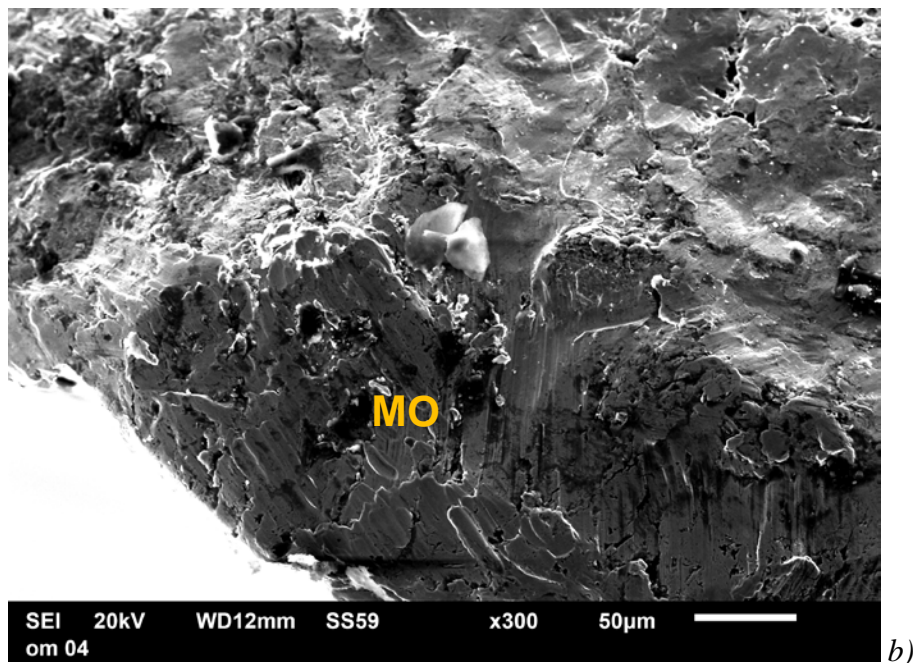
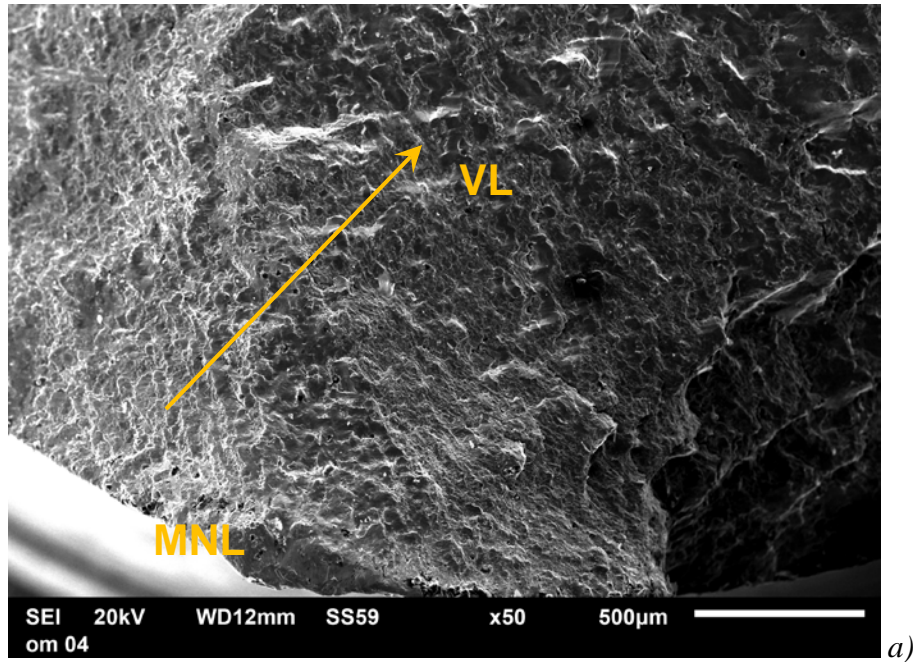


Slika 4.1. Mikrostruktura osnovnog metala (DB-donji beinit, GB-gornji beinit)

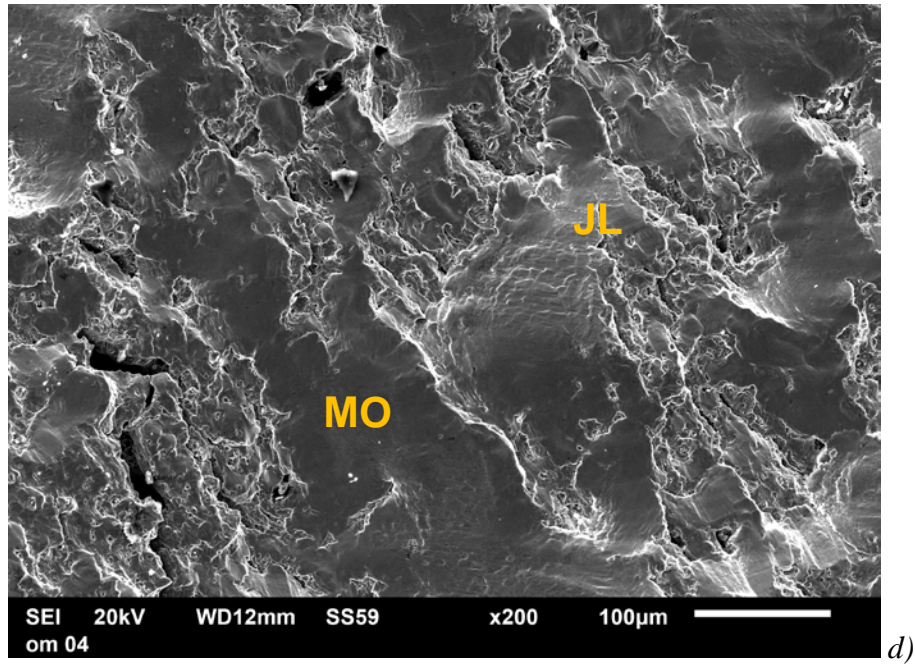
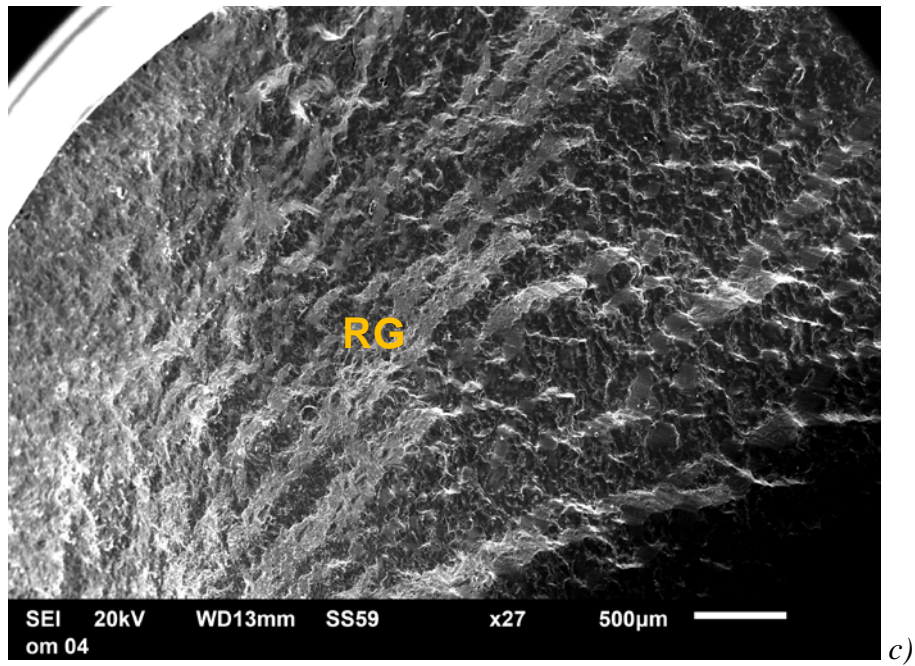


Slika 4.2. Mikrostruktura ZUT (DB-donji beinit, GB-gornji beinit)

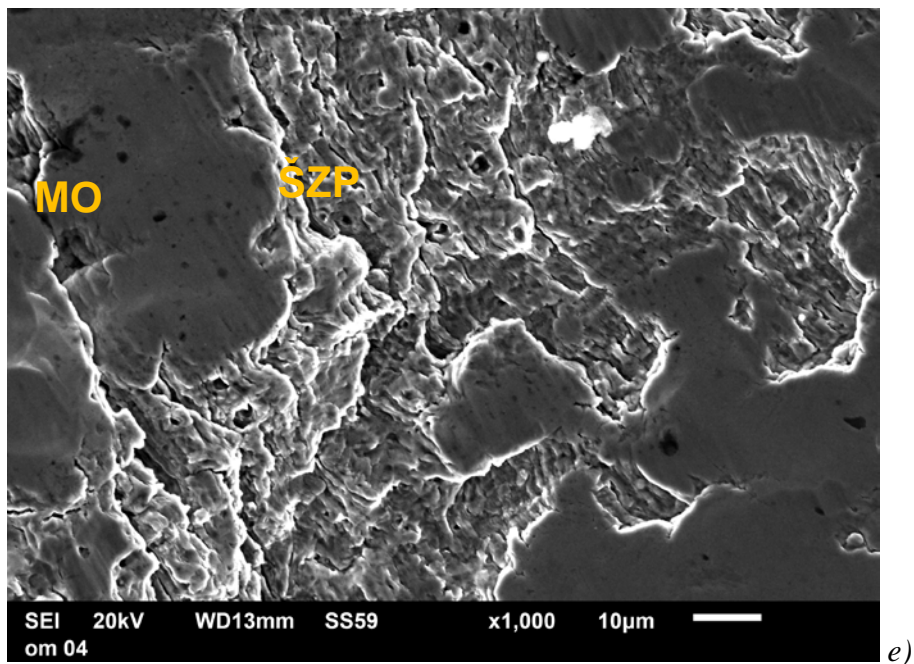
Kod metalografije površina preloma uzoraka ispitivanih pri delovanju niskocikličnog zamora, prikazane su slike dobijene na SEM za najmanju i najveću vrednost amplitude deformacije za OM, sl. 4.3 ( $\Delta\varepsilon/2 = 0.45\%$ ), sl. 4.4 ( $\Delta\varepsilon/2 = 0.80\%$ ) i SZUT, sl. 4.5 ( $\Delta\varepsilon/2 = 0.40\%$ ), sl. 4.6 ( $\Delta\varepsilon/2 = 0.70\%$ ).



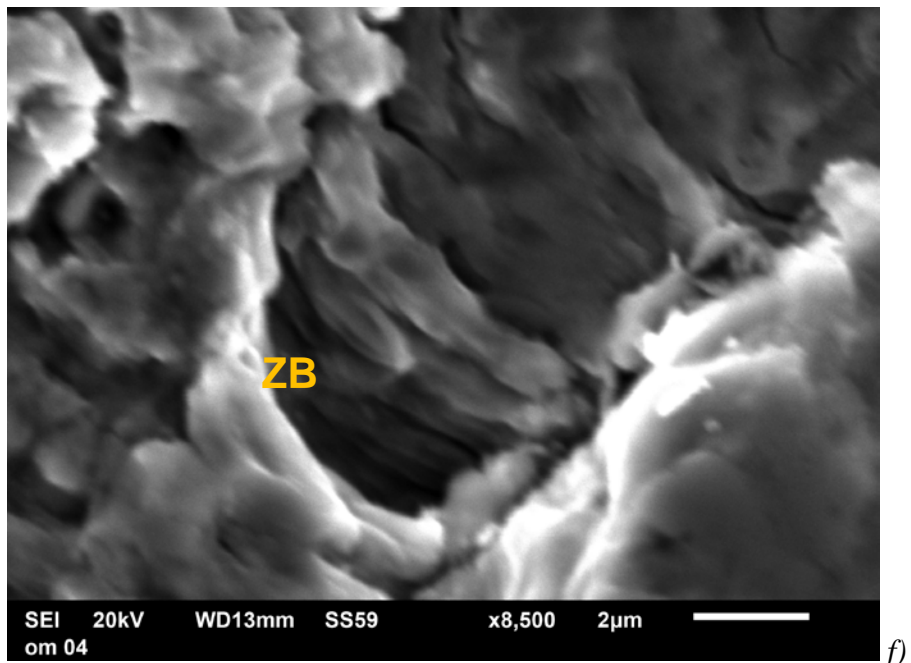
Slika 4.3. SEM prelomne površine, OM,  $\Delta\varepsilon/2 = 0.45\%$ ,  $N_f = 1445$  ciklusa mesto nastanka loma (MNL), vlaknast lom (VL), mehaničko oštećenje (MO)



Slika 4.3. SEM prelomne površine, OM,  $\Delta\epsilon/2 = 0.45\%$ ,  $N_f = 1445$  ciklusa (nastavak)  
radijalni grebeni (RG), mehaničko oštećenje (MO), jamičasti lom (JL)

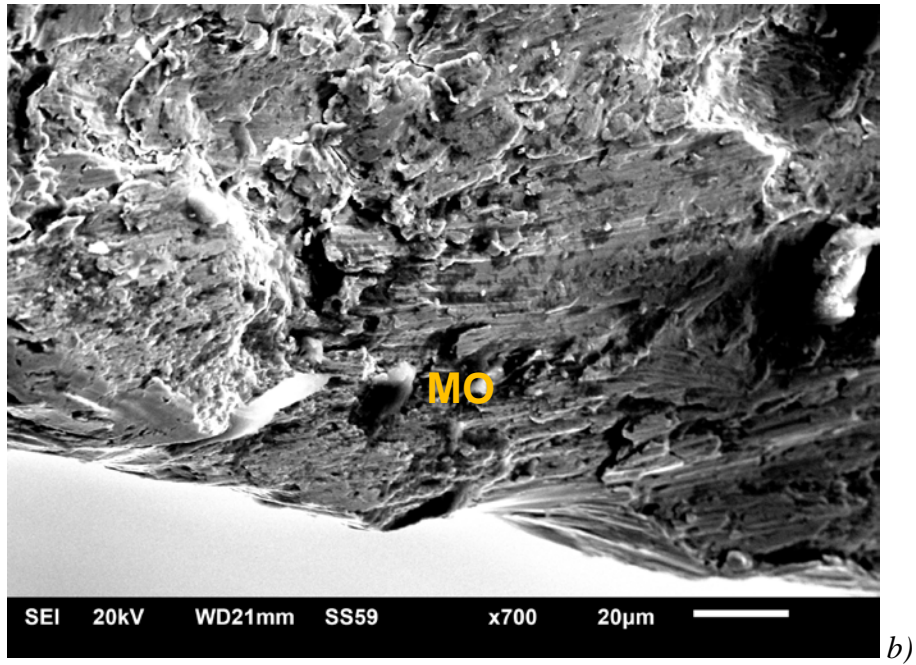
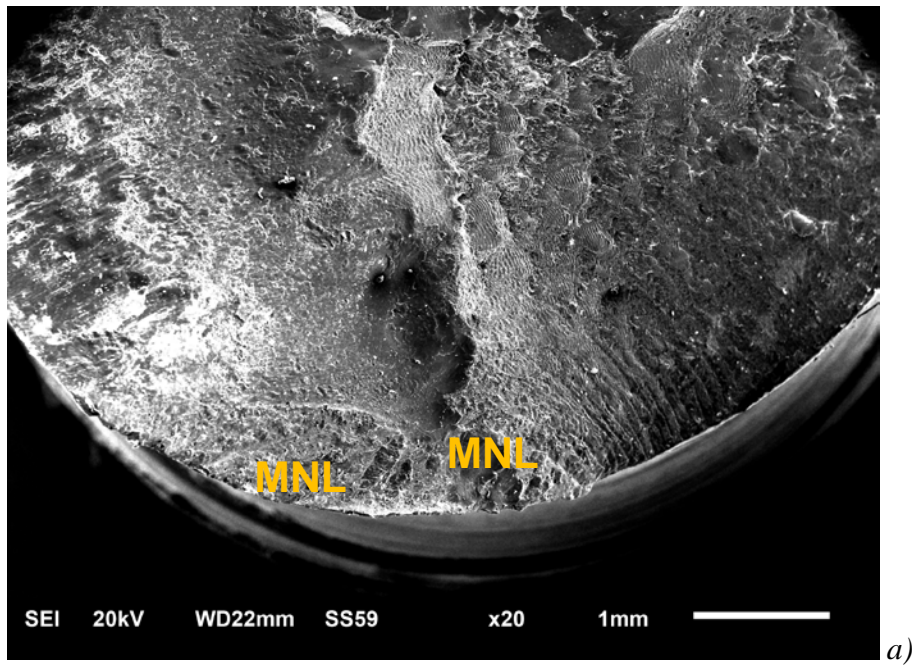


e)

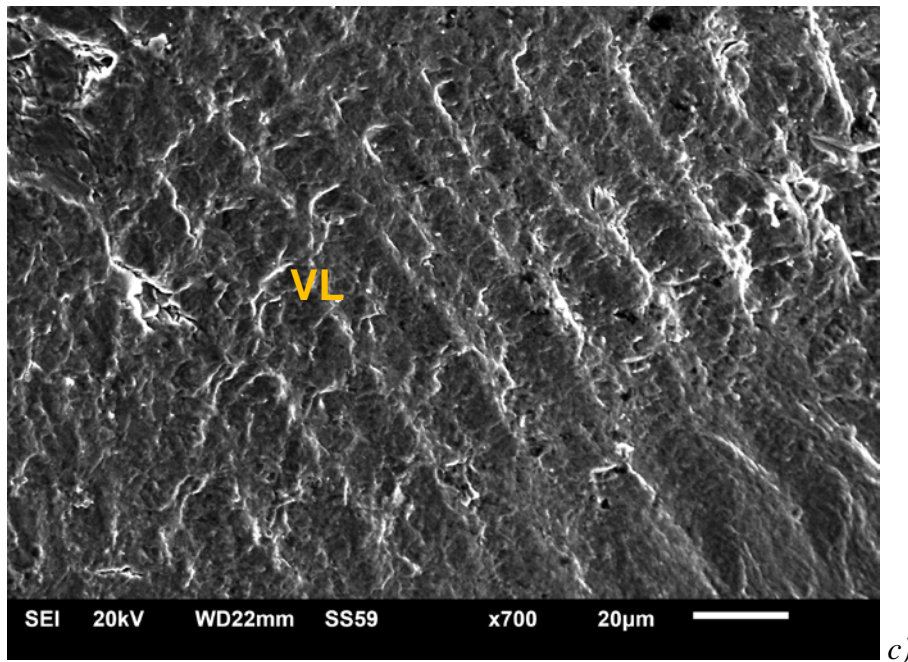


f)

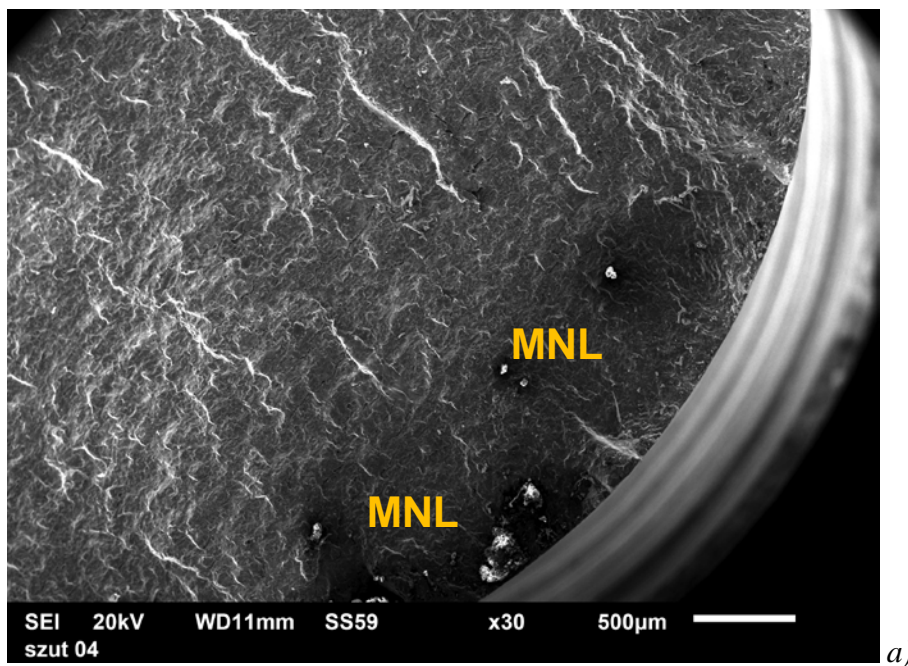
Slika 4.3. SEM prelomne površine, OM,  $\Delta\epsilon/2 = 0.45\%$ ,  $N_f = 1445$  ciklusa (nastavak) mehaničko oštećenje (MO), širenje zamorne prsline (ŠZP), zamorne brazde (ZB)



Slika 4.4. SEM prelomne površine, OM,  $\Delta\epsilon/2 = 0.80\%$ ,  $N_f = 207$  ciklusa mesto nastanka loma (MNL), mehaničko oštećenje (MO)

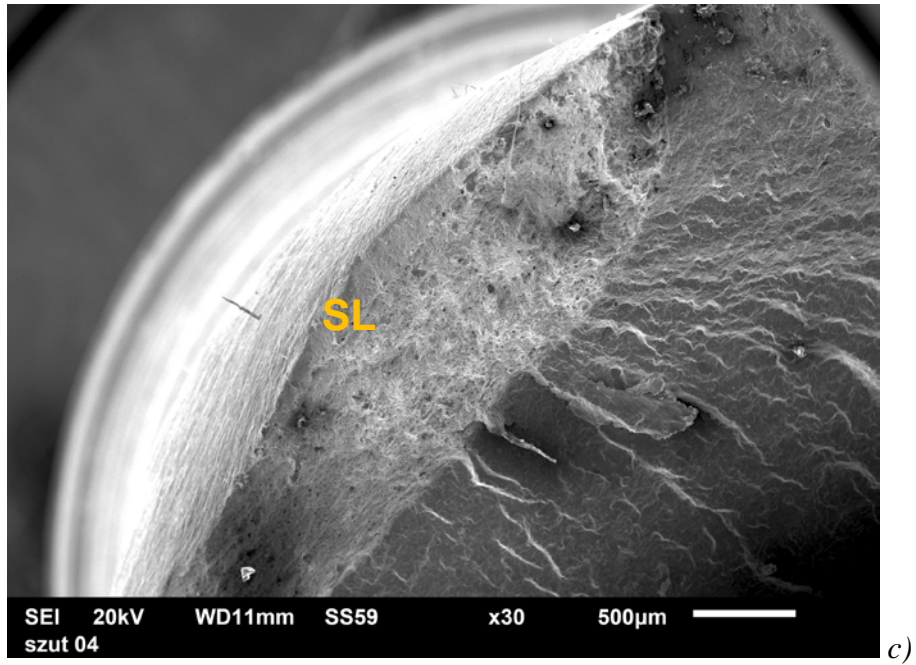
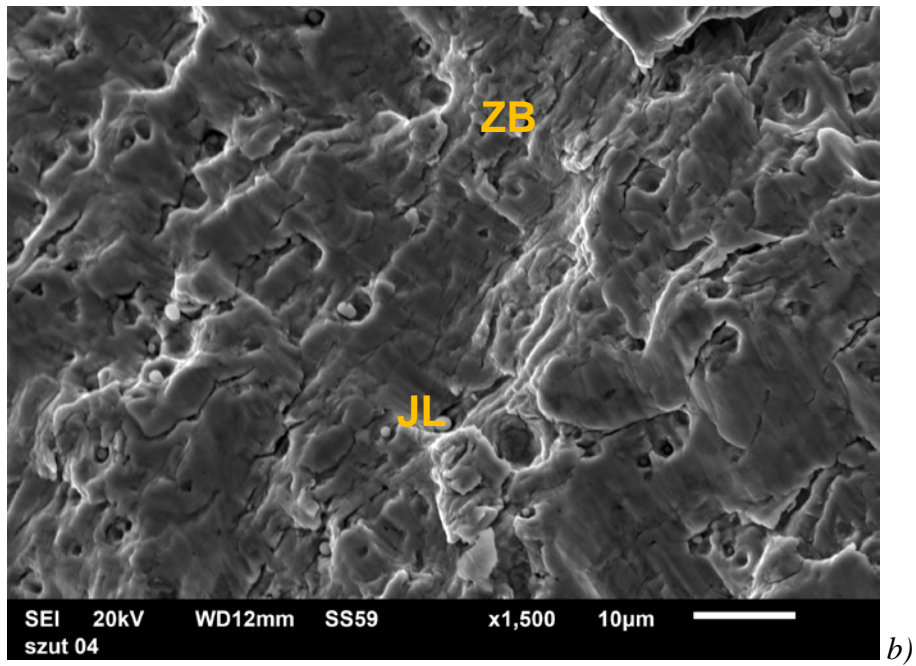


Slika 4.4. SEM prelomne površine, OM,  $\Delta\varepsilon/2 = 0.80\%$ ,  $N_f = 207$  ciklusa (nastavak)  
vlaknast lom (VL)

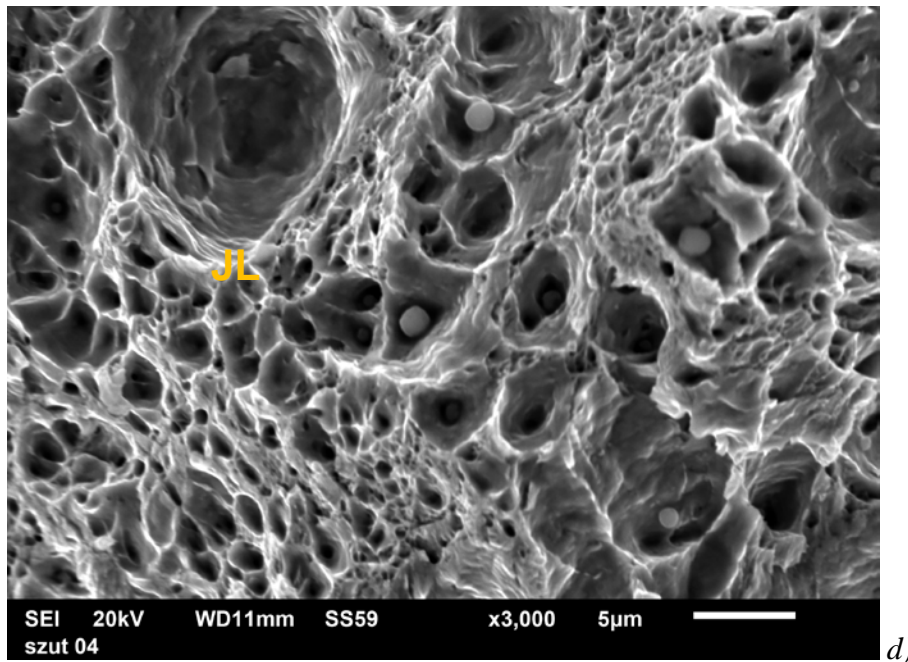


Slika 4.5. SEM prelomne površine, SZUT,  $\Delta\varepsilon/2 = 0.40\%$ ,  $N_f = 2736$  ciklusa  
mesto nastanka loma (MNL)



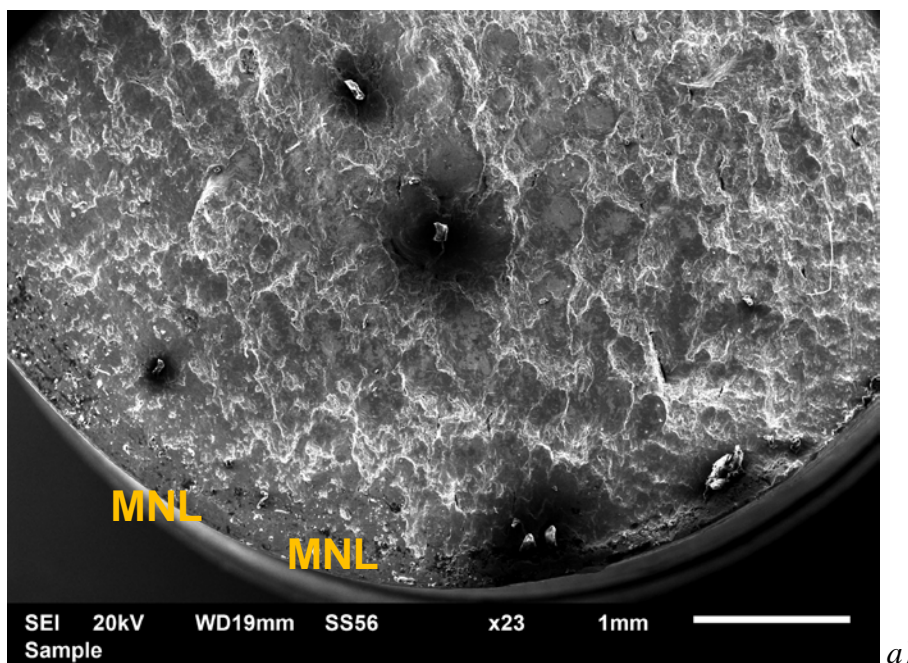


Slika 4.5. SEM prelomne površine, SZUT,  $\Delta\varepsilon/2 = 0.40\%$ ,  $N_f = 2736$  ciklusa (nastavak)  
zamorne brazde (ZB), jamičasti lom (JL), statički lom (SL)



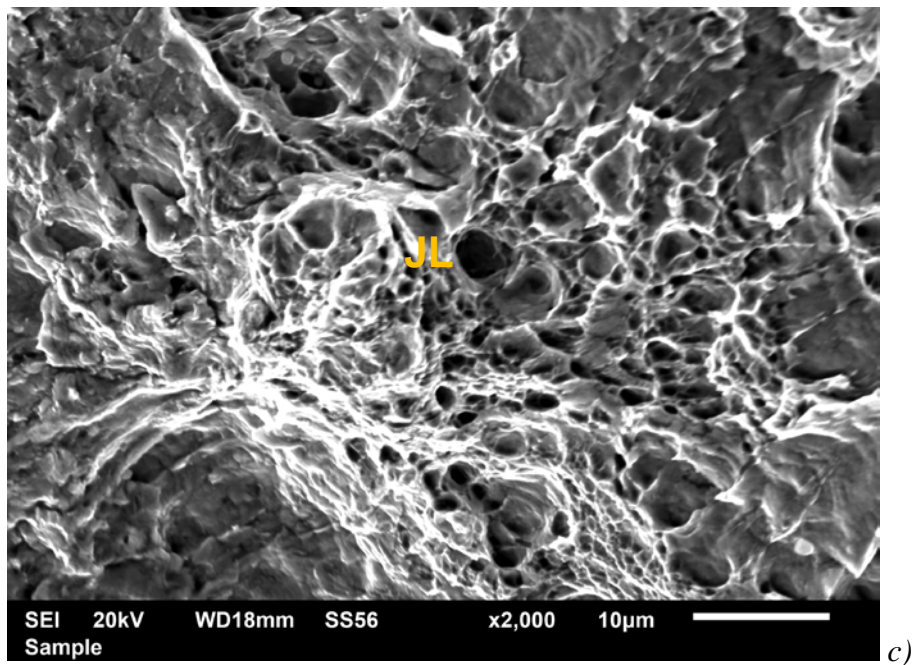
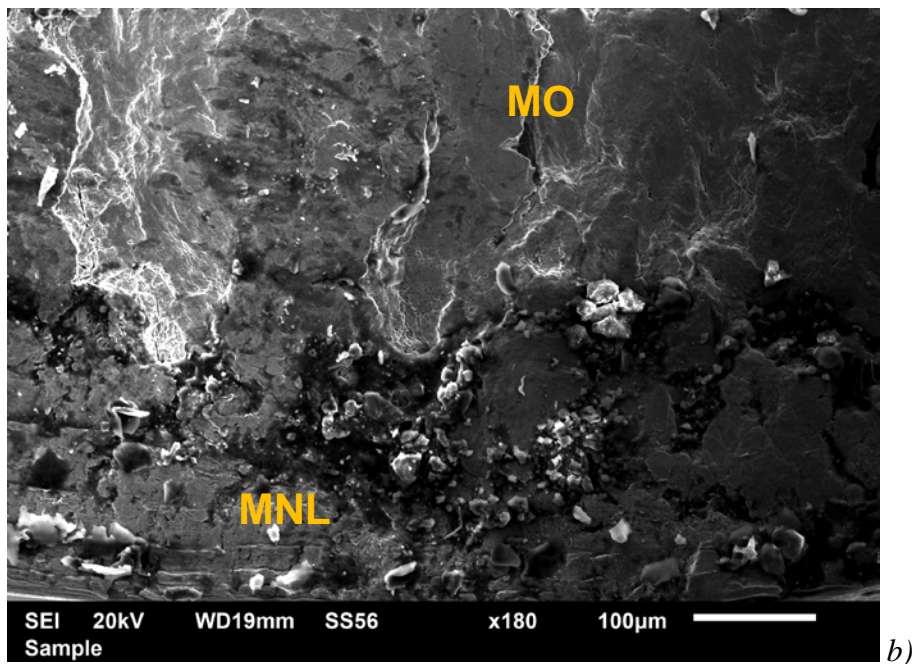
d)

Slika 4.5. SEM prelomne površine, SZUT,  $\Delta\varepsilon/2 = 0.40 \%$ ,  $N_f = 2736$  ciklusa (nastavak)  
jamičasti lom (JL)



a)

Slika 4.6. SEM prelomne površine, SZUT,  $\Delta\varepsilon/2 = 0.70 \%$ ,  $N_f = 172$  ciklusa  
mesto nastanka loma (MNL)



Slika 4.6. SEM prelomne površine, SZUT,  $\Delta\epsilon/2 = 0.70\%$ ,  $N_f = 172$  ciklusa (nastavak) mehaničko oštećenje (MO), mesto nastanka loma (MNL), jamičasti lom (JL)

## 4.2.3. Određivanje modula elastičnosti

Za određivanje modula elastičnosti  $E$ , epruveta OM i SZUT korišćeni su delovi monotoničkih naponsko-deformacionih krivih ( $N_{1/4}$ ), rezultata ispitivanja NCZ, Prilozi 14 i 15, kao i preporuke standarda ASTM E 111-04 [114]. Obrada podataka izvršena je u programu EXCEL i dobijene su ( $\epsilon$ ,  $\sigma$ ) tačke, koje su korišćene za izradu dijagrama delova monotoničkih naponsko-deformacionih krivih koji prethode prvim ( $N = 1/4$ ) ciklusima, koji su poslužili za očitavanje modula elastičnosti za svaku epruvetu, Prilog 14 (za OM) i Prilog 15 (za SZUT). Dobijene vrednosti modula elastičnosti osnovnog materijala i materijala simuliranog ZUT-a, uključujući i srednju vrednost  $E_{sr}$ , date su u tabelama 4.4 (za OM) i 4.5 (za SZUT).

Tabela 4.4. Moduli elastičnosti za LCF ispitivanja,  $N_{1/4}$ , OM

NN-70	Moduli elastičnosti za $N_{1/4}$				Brzina opterećenja, $v_{opt}$	Poluraspon amplitude deformacije, $\Delta\epsilon/2$
	$E_0$		$E_1$			
	MPa	GPa	MPa	GPa	$\text{kN/mm}^2/\text{s}$	%
<b>OM-09</b>	210898	210.9	205564	205.6	0.40	<b>0.35</b>
<b>OM-01</b>	215948	215.9	216826	216.8	0.70	<b>0.35</b>
<b>OM-10</b>	228000	228.0	220014	220.0	0.33	<b>0.45</b>
<b>OM-02</b>	207322	207.3	211729	211.7	0.54	<b>0.50</b>
<b>OM-03</b>	233363	233.4	212305	212.3	0.52	<b>0.50</b>
<b>OM-06</b>	226470	226.5	228333	228.3	0.39	<b>0.60</b>
<b>OM-07</b>	225206	225.2	230976	231.0	0.57	<b>0.60</b>
<b>OM-04</b>	247357	247.4	244391	244.4	1.41	<b>0.70</b>
<b>OM-05</b>	212279	212.3	212454	212.5	0.77	<b>0.70</b>
<b>OM-08</b>	226437	226.4	211680	211.7	0.43	<b>0.80</b>
Sr.vred.	<b>223328</b>	<b>223.3</b>	<b>219427</b>	<b>219.4</b>	<b>0.61</b>	
	<b>Sr.vred. za proračun</b>			<b>221.4</b>		

Tabela 4.5. Moduli elastičnosti za LCF ispitivanja,  $N_{1/4}$ , SZUT

NN-70	Moduli elastičnosti za $N_{1/4}$				Brzina opterećenja, $v_{opt}$	Poluraspon amplitude deformacije, $\Delta\epsilon/2$
	$E_0$		$E_1$			
	MPa	GPa	MPa	GPa	kN/mm <sup>2</sup> /s	%
<b>SZUT-08</b>	247776	247.8	219391	219.4	0.82	<b>0.40</b>
<b>SZUT-09</b>	240990	241.0	219796	219.8	0.75	<b>0.40</b>
<b>SZUT-10</b>	216213	216.2	266887	266.9	0.63	<b>0.40</b>
<b>SZUT-01</b>	204070	204.1	229375	229.4	1.10	<b>0.50</b>
<b>SZUT-06</b>	215608	215.6	201633	201.6	0.99	<b>0.50</b>
<b>SZUT-07</b>	218720	218.7	210453	210.5	1.24	<b>0.50</b>
<b>SZUT-04</b>	209251	209.3	214122	214.1	0.90	<b>0.60</b>
<b>SZUT-05</b>	221100	221.1	232431	232.4	0.91	<b>0.60</b>
<b>SZUT-02</b>	238557	238.6	198762	198.8	0.89	<b>0.70</b>
<b>SZUT-03</b>	246800	246.8	248153	248.2	1.73	<b>0.70</b>
Sr.vred.	<b>225909</b>	<b>225.9</b>	<b>224100</b>	<b>224.1</b>	<b>1.00</b>	
	<b>Sr.vred. za proračun</b>			<b>225.0</b>		

#### 4.2.4. Određivanje područja stabilizacije i karakterističnih ciklusa

Od ekstremnih vrednosti sila opterećenja ( $F_{max}$  i  $F_{min}$ ) koje pripadaju gornjim i donjim tačkama histereza naponsko-deformacionog odziva za sve N-te cikluse, filtriranjem podataka u EXCELU, sl. 2.35, formirani su posebni fajlovi, koji su poslužili za izradu dijagrama ekstremnih sila opterećenja, F-N krive, prikazanih na sl. P16.1 (za OM) i sl. P16.2 (za SZUT), Priloga 16.

Na pozitivnom delu F-N krivih, filtriranjem podataka u EXCEL-u, određen je pravolinijski deo krive koji predstavlja područje stabilizacije (područje stabilizovanih histereza), a nakon toga i područje inicijacije do praga NDT i to je predstavljeno na dijagramima u tabeli P17.1 do P17.10 (za OM) i tabeli P17.11 do P17.20 (za SZUT), Priloga 17. To nam je omogućilo da odredimo karakteristične stabilizovane cikluse za svaki amplitudni nivo deformacije, a što je, takođe, prikazano u tabelama P17.1 do P17.10 (za OM) i P17.11 do P17.20 (za SZUT), Priloga 17.

U Prilogu 20, dat je uporedni pregled karakterističnih stabilizovanih ciklusa za svaki amplitudni nivo deformacije epruveta OM i SZUT, kao i dijagrami sa tabelom analize zavisnosti karakterističnih ciklusa i poluraspona deformacije za epruvete OM i SZUT.

#### 4.2.5. Određivanje podataka stabilizovanih histerezisnih krivih

Posle identifikacije karakterističnih stabilizovanih ciklusa u EXCEL-u su iscrtani dijagrami karakterističnih stabilizovanih histerezisnih krivih, slike u tabelama P18.1 do P18.10 (za OM) i u tabelama P18.11 do P18.20 (za SZUT), Priloga 18, pa zatim očitani potrebni podaci prema tački 2.3.5. Poglavlja 2, koji su upisani u tabele P18.1 do P18.10 (za OM) i u tabele P18.11 do P18.20 (za SZUT), Priloga 18.

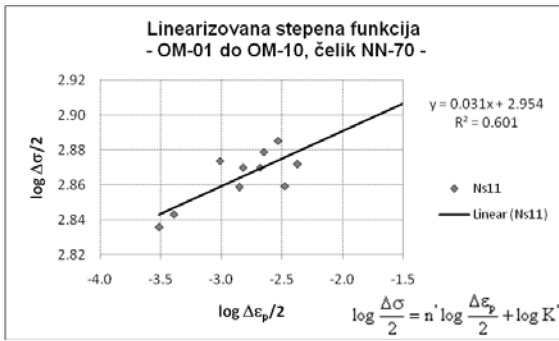
#### 4.2.6. Grupisanje podataka za proračun za odabrane cikluse stabilizacije

U tabelama P19.1A do P19.8A (za OM) i P.19.9A do P.19.16A (za SZUT), Priloga 19, grupisani su podaci za sve amplitudne nivo deformacije, za odabrane cikluse stabilizacije, a u tabelama P19.1B do P.19.8B (za OM) i P19.9B do P19.16B (za SZUT), Priloga 19, prikazani su rezultati izvršenog pripremnog proračuna za konstruisanje Ciklične naponsko deformacione krive i Osnovne krive niskocikličnog zamora.

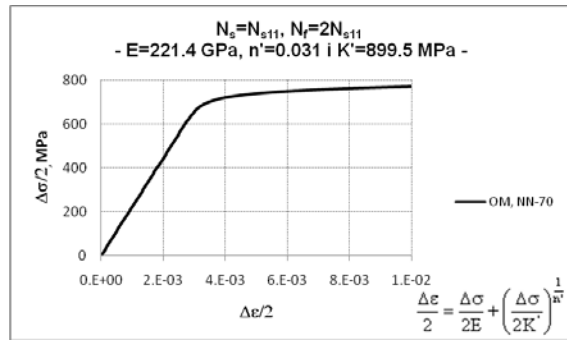
#### 4.2.7. Konstruisanje CNDK i OKNCZ

Na osnovu podataka iz tabela P19.1B do P19.8B (za OM) i P.19.9B do P.19.16B (za SZUT), Priloga 19 određene su linearizovane stepene funkcije, a iz njih eksponenti i koeficijenti potrebni za konstruisanje CNDK, sl. 4.7 do 4.14 (za OM) i sl. 4.15 do 4.22 (za SZUT). Na tim slikama prikazano je i poređenje Cikličnih i Monotone naponsko deformacionih krivih.

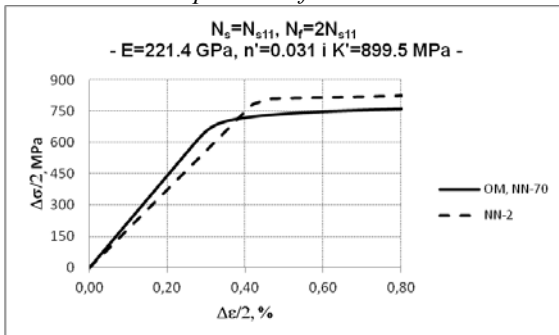
Takođe, na sl. 4.7 do 4.14 (za OM) i sl. 4.15 do 4.22 (za SZUT) prikazane su i linearizovane elastične komponente i linearizovane plastične komponente određene na osnovu podataka iz tabela P19.1B do P19.8B (za OM) i P.19.9B do P.19.16B (za SZUT), Priloga 19, a radi određivanja eksponenata i koeficijenata, potrebnih za konstruisanje OKNCZ. Odnos  $\sigma_{\max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za sve nivoe deformacija, kao i OKNCZ definisani preko odgovarajuće stabilizovane histreze prikazani su, takođe, na sl. 4.7 do 4.14 (za OM) i sl. 4.15 do 4.22 (za SZUT).



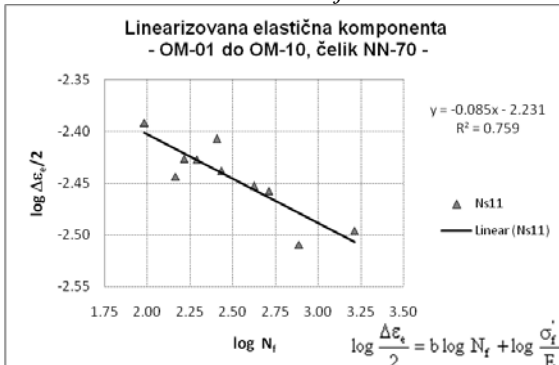
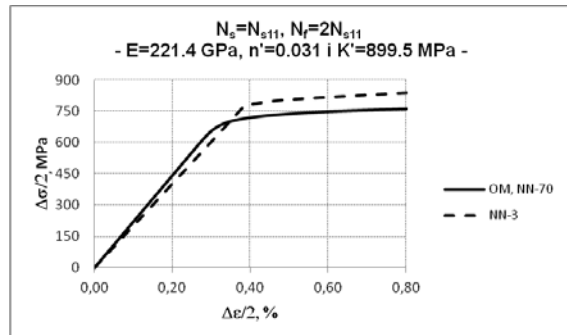
EkspONENT  $n' = 0.031$  i KOEFICIJENT  $\log K' = 2.954$  ciklično naponsko deformacione krive



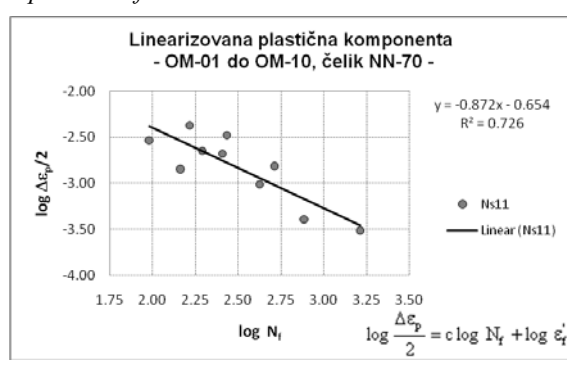
Ciklična naponsko deformaciona kriva



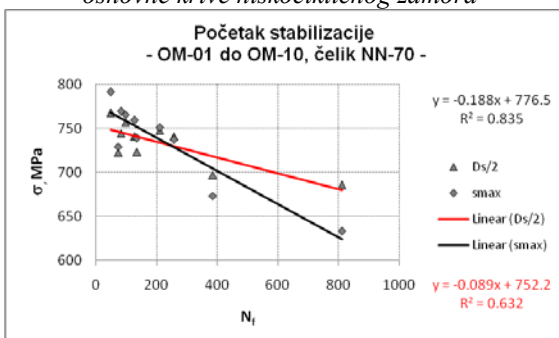
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



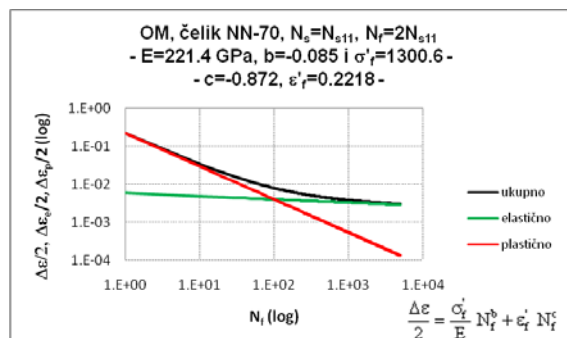
EkspONENT  $b = -0.085$  i KOEFICIJENT  $\log \frac{\sigma_f'}{E} = -2.231$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.872$  i KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -0.654$  osnovne krive niskocikličnog zamora

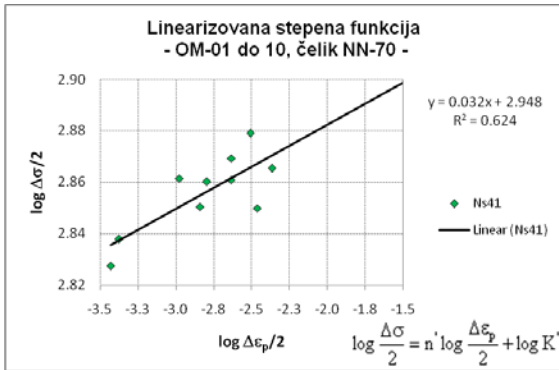


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta \sigma / 2$  za nivo deformacije  $\Delta \epsilon / 2 = 0.35$  do 0.80

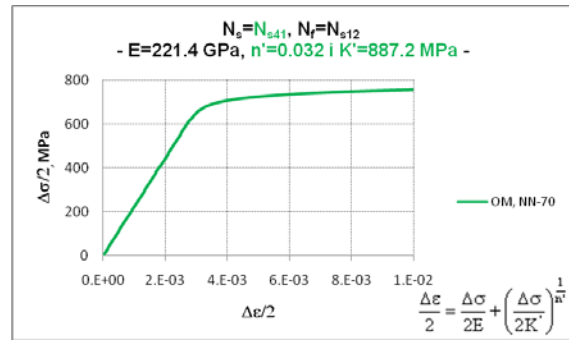


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

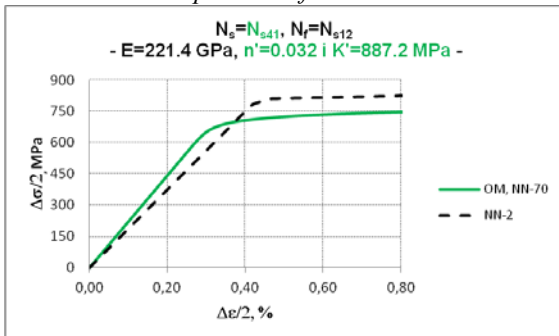
Slika 4.7. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_s$  = početak stabilizacije



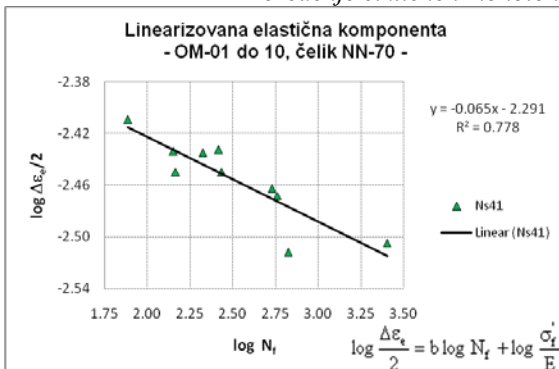
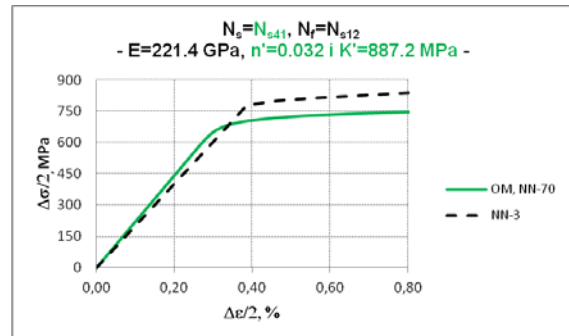
EkspONENT  $n' = 0.032$  i KOEFICIJENT  $\log K' = 2.948$  ciklično naponsko deformacione krive



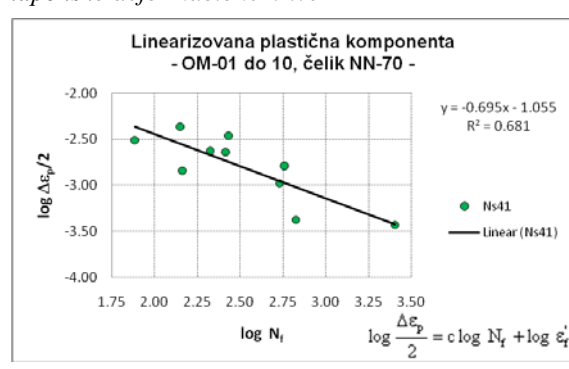
Ciklična naponsko deformaciona kriva



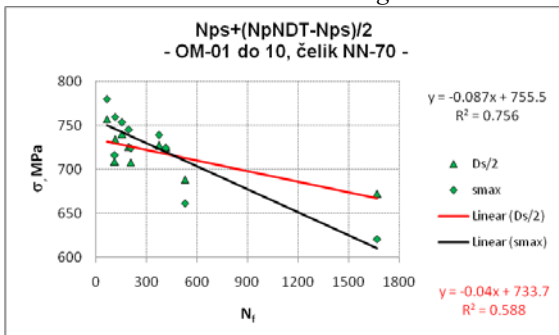
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



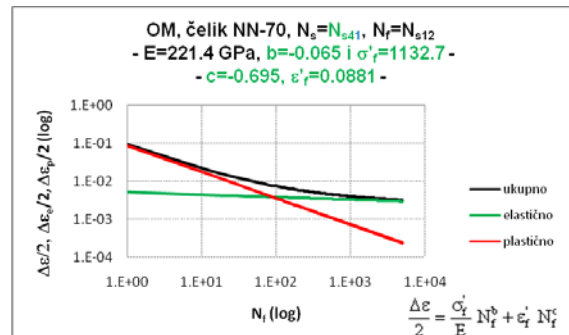
EkspONENT  $b = -0.065$  i KOEFICIJENT  $\log \frac{\sigma_f'}{E} = -2.291$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.695$  i KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -1.055$  osnovne krive niskocikličnog zamora



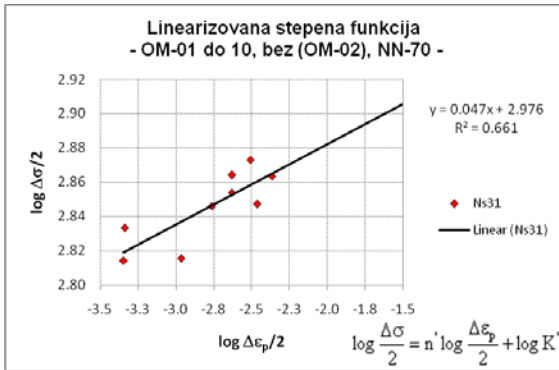
Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta \sigma / 2$  za nivo deformacije  $\Delta \epsilon / 2 = 0.35$  do  $0.80$



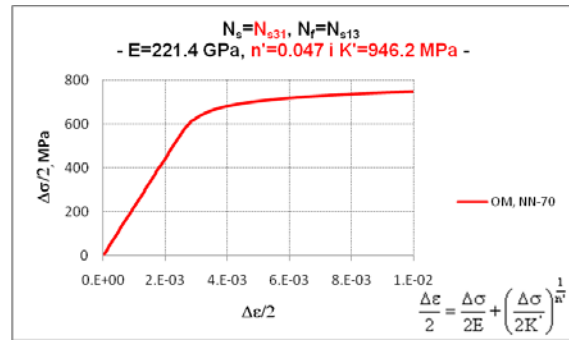
Osnovna kriva niskocikličnog zamora

Slika 4.8. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_f =$  prag NDT

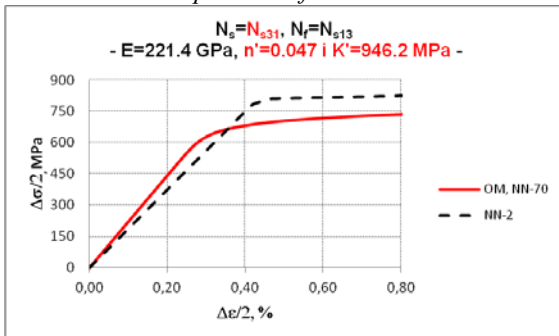




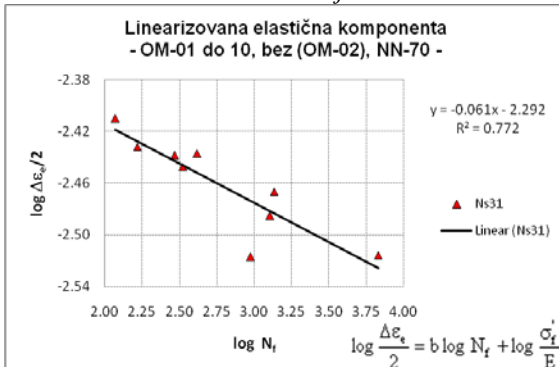
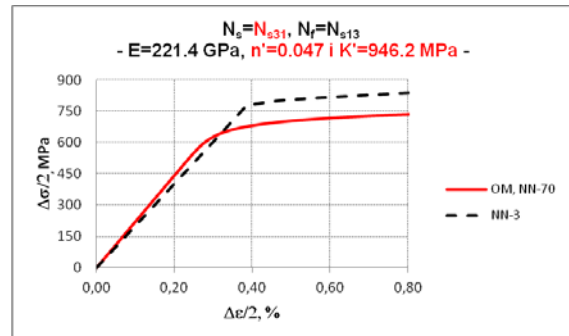
EkspONENT  $n' = 0.047$  i KOEFICIJENT  $\log K' = 2.976$  ciklično naponsko deformacione krive



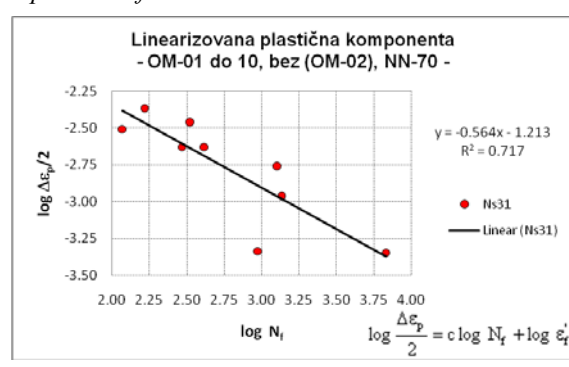
Ciklična naponsko deformaciona kriva



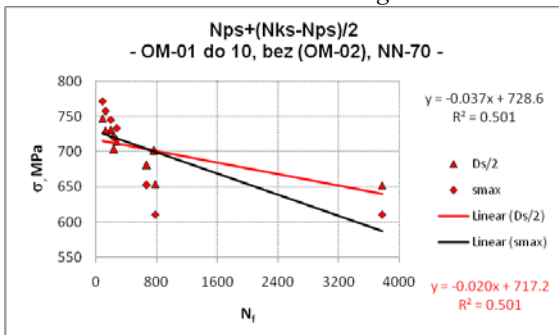
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



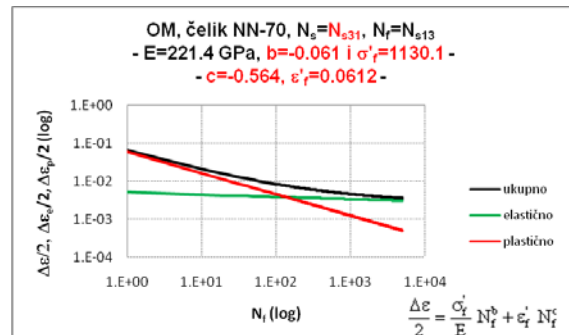
EkspONENT  $b = -0.061$  i KOEFICIJENT  $\log \sigma_f'/E = -2.292$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.564$  i KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -1.213$  osnovne krive niskocikličnog zamora

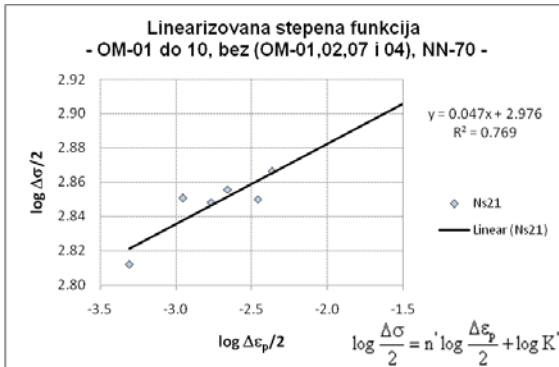


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.35$  do 0.80

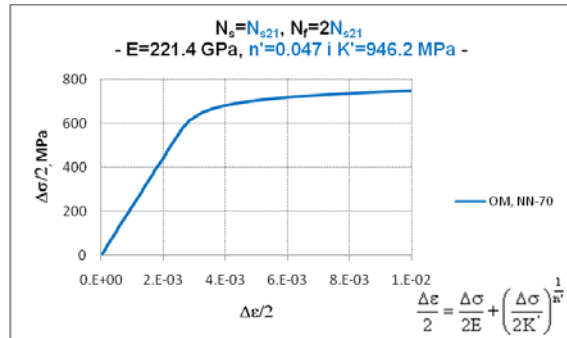


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

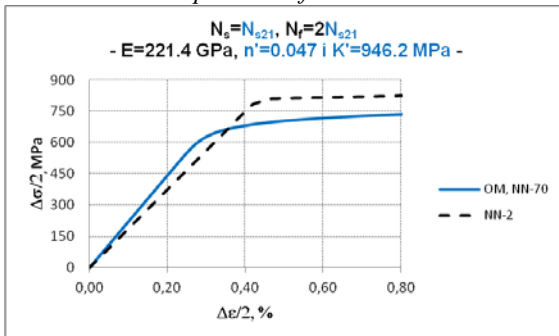
Slika 4.9. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_f$  = kraj stabilizacije



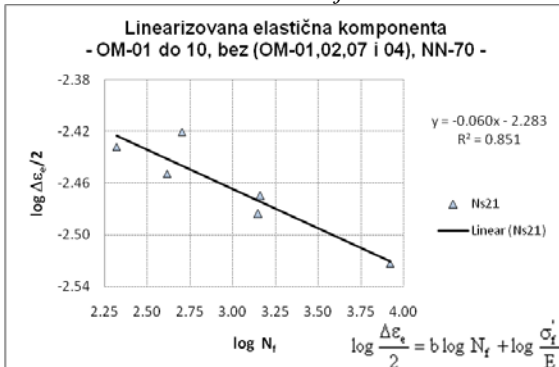
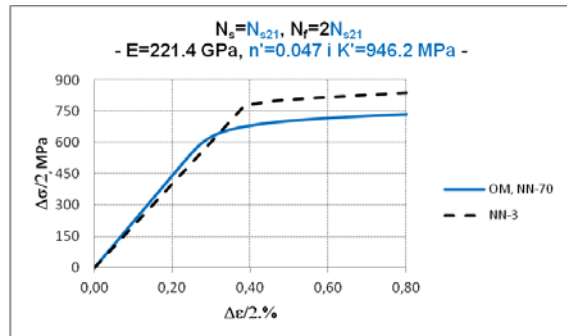
EkspONENT  $n' = 0.047$  i KOEFICIJENT  $\log K' = 2.976$  ciklično naponsko deformacione krive



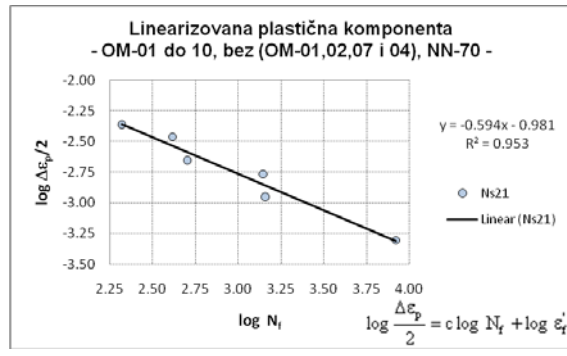
Ciklična naponsko deformaciona kriva



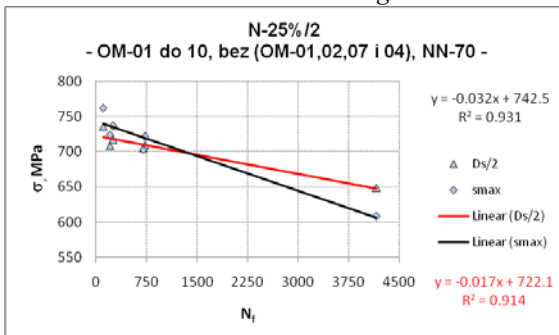
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



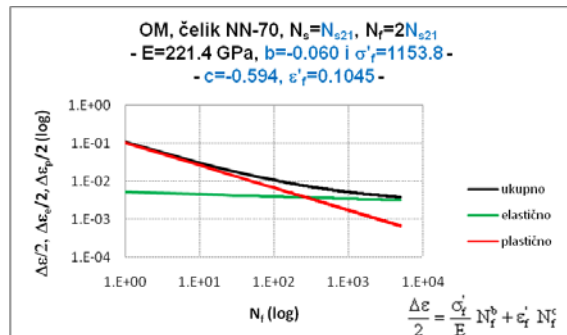
EkspONENT  $b = -0.060$  i KOEFICIJENT  $\log \frac{\sigma_f'}{E} = -2.283$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.594$  i KOEFICIJENT  $\log \varepsilon_f' = -0.981$  osnovne krive niskocikličnog zamora

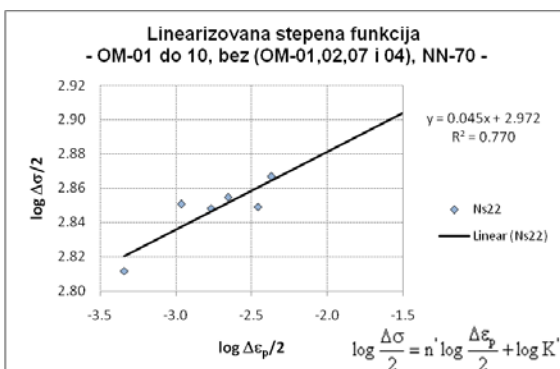


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\varepsilon/2=0.35$  do 0.80

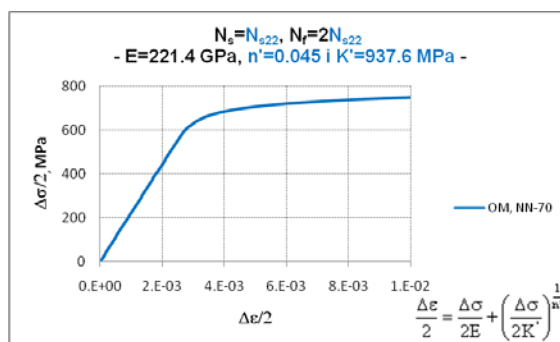


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

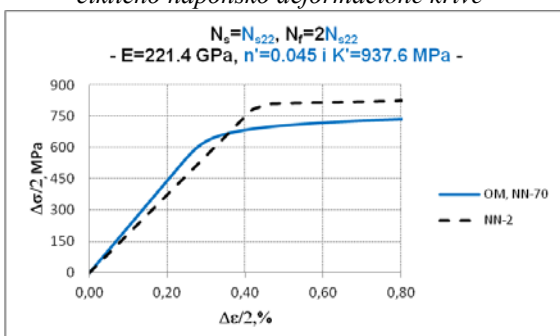
Slika 4.10. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_f =$  pad sile za 25%



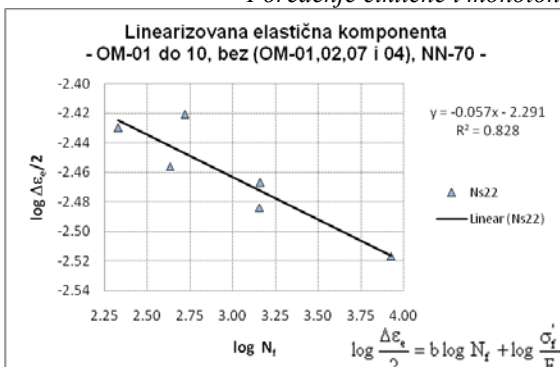
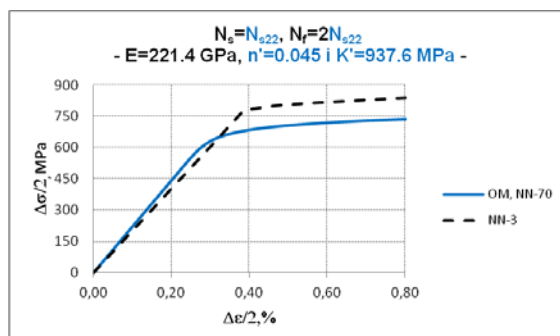
EkspONENT  $n' = 0.045$  i koeficijent  $\log K' = 2.972$  ciklično naponsko deformacione krive



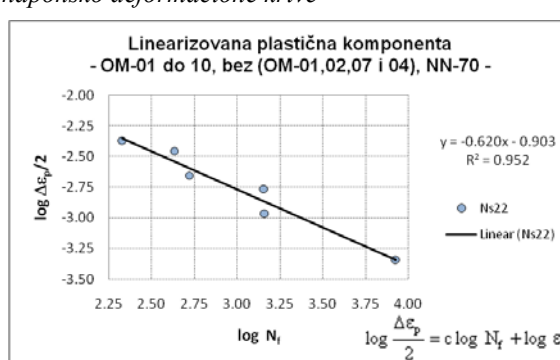
Ciklična naponsko deformaciona kriva



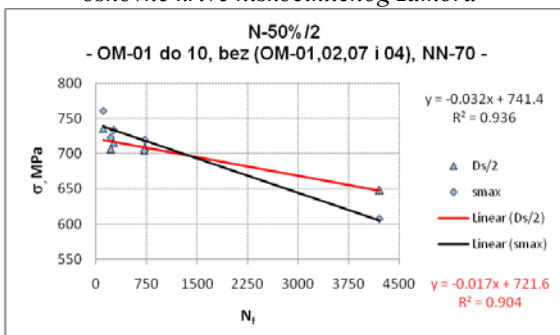
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



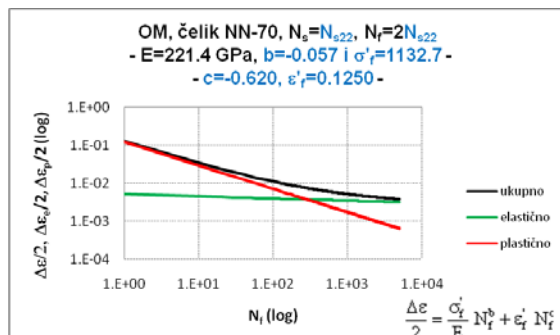
EkspONENT  $b = -0.057$  i koeficijent  $\log \frac{\sigma_f'}{E} = -2.291$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.620$  i koeficijent  $\log \epsilon_f' = -0.903$  osnovne krive niskocikličnog zamora

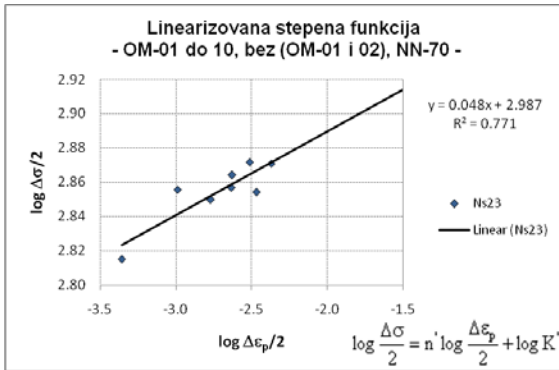


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.35$  do 0.80

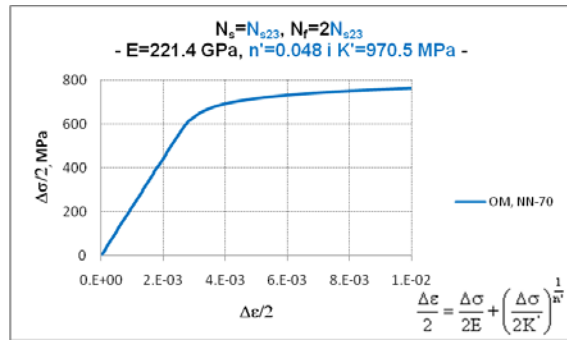


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

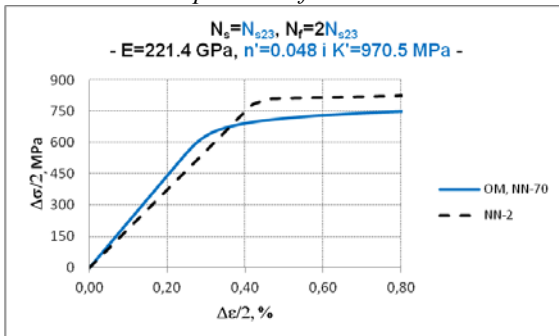
Slika 4.11. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_f = \text{pad sile za } 50\%$



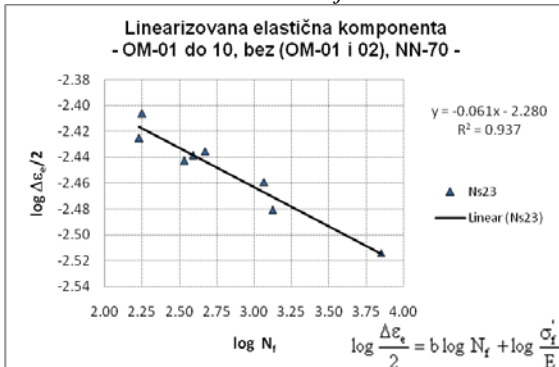
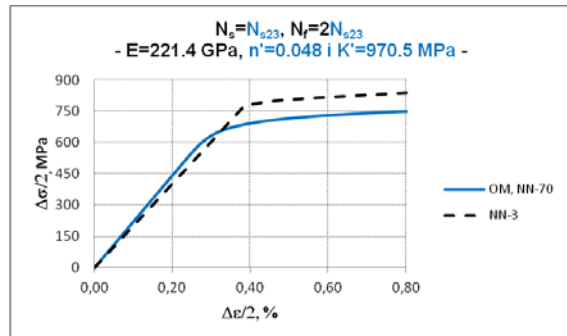
EkspONENT  $n' = 0.048$  I KOEFICIJENT  $\log K' = 2.987$  ciklično naponsko deformacione krive



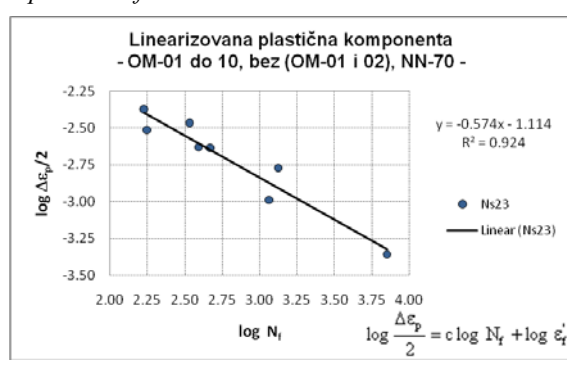
Ciklična naponsko deformaciona kriva



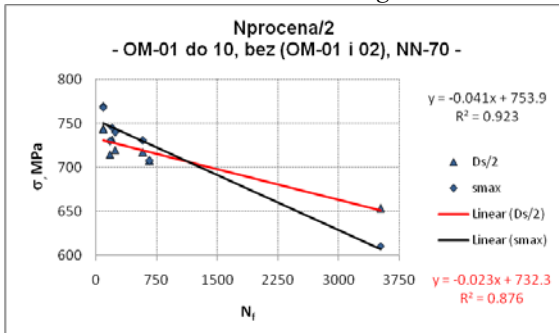
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



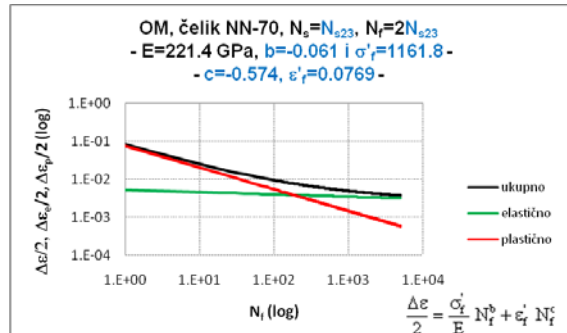
EkspONENT  $b = -0.061$  I KOEFICIJENT  $\log \frac{\sigma_f'}{E} = -2.280$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.574$  I KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -1.114$  osnovne krive niskocikličnog zamora

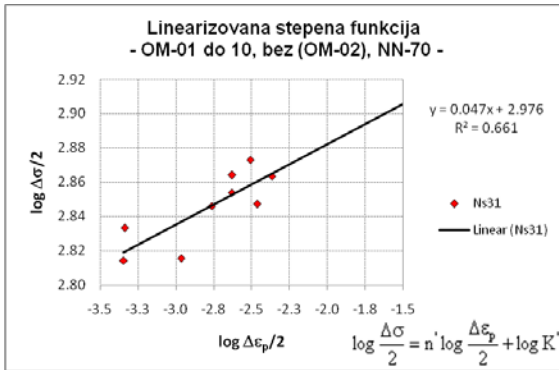


Odnos  $\sigma_{\max}$  I  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2 = 0.35$  do 0.80

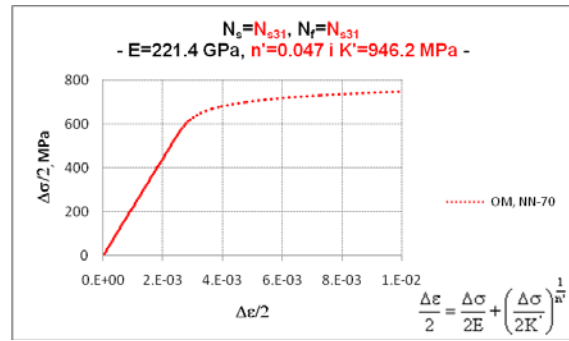


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

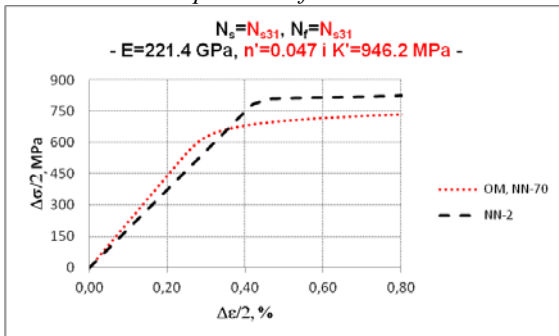
Slika 4.12. Konstruisanje CNDK I OKNCZ, OM,  $N_f$  = procena na osnovu iskustva



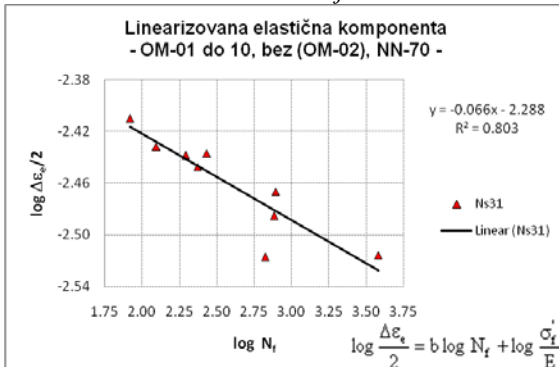
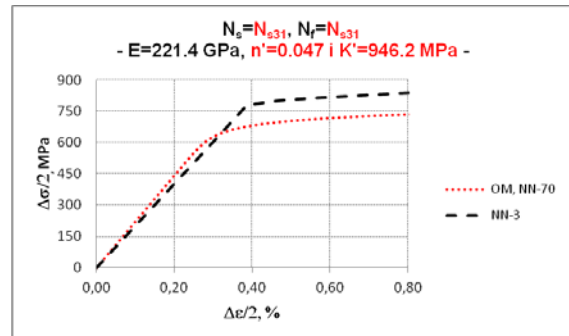
EkspONENT  $n' = 0.047$  i koeficijent  $\log K' = 2.976$  ciklično naponsko deformacione krive



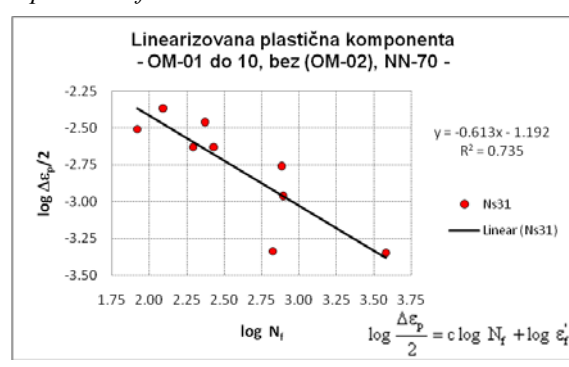
Ciklična naponsko deformaciona kriva



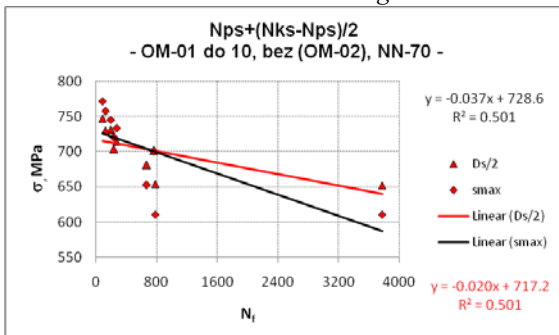
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



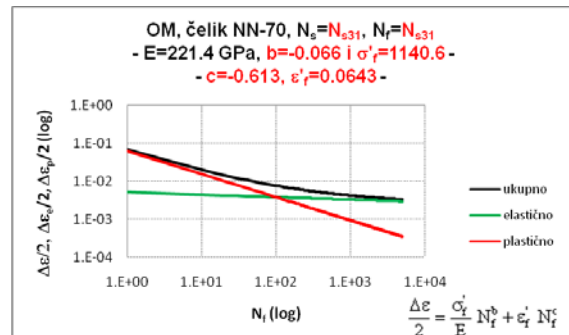
EkspONENT  $b = -0.066$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.288$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.613$  i koeficijent  $\log \varepsilon_f' = -1.192$  osnovne krive niskocikličnog zamora

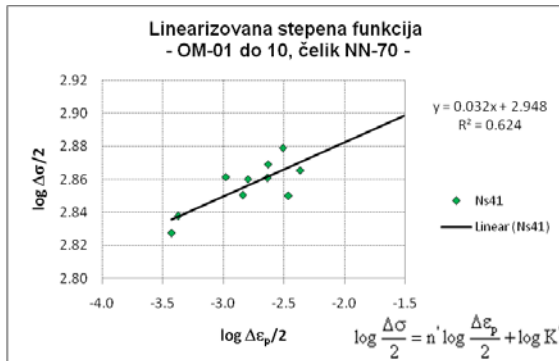


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\varepsilon/2 = 0.35$  do 0.80

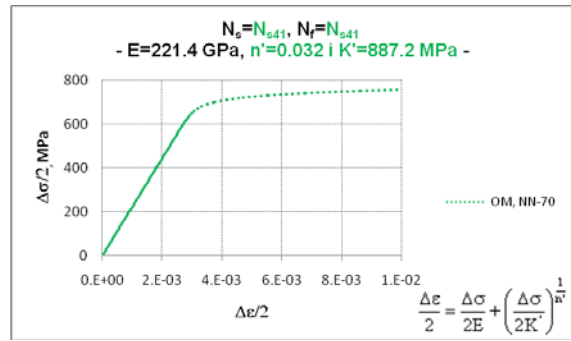


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

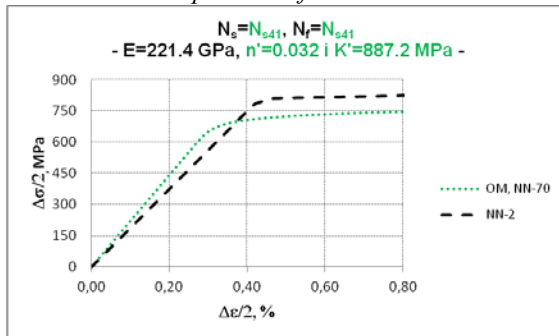
Slika 4. 13. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_f = N_s =$  sredina stabilizacije



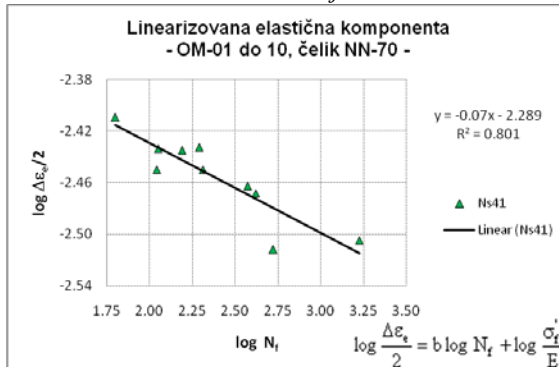
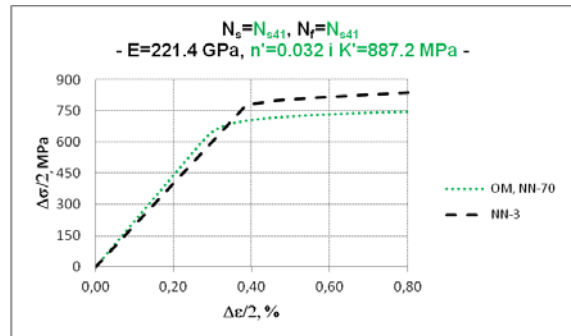
Eksponent  $n' = 0.032$  i koeficijent  $\log K' = 2.948$  ciklično naponsko deformacione krive



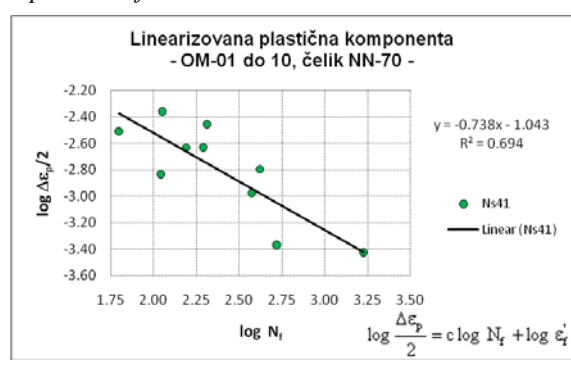
Ciklična naponsko deformaciona kriva



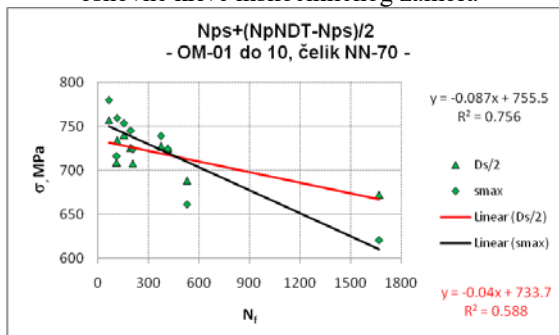
Poređenje ciklične i monotone naponsko deformacione krive



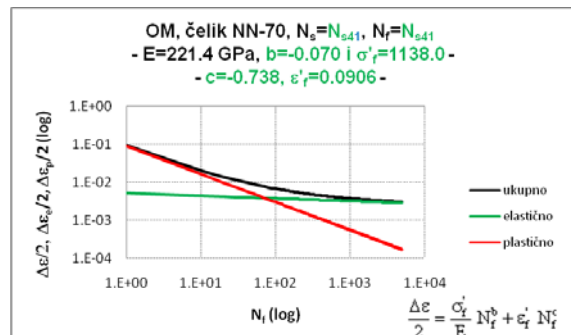
Eksponent  $b = -0.070$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.289$  osnovne krive niskocikličnog zamora



Eksponent  $c = -0.738$  i koeficijent  $\log \epsilon_f' = -1.043$  osnovne krive niskocikličnog zamora

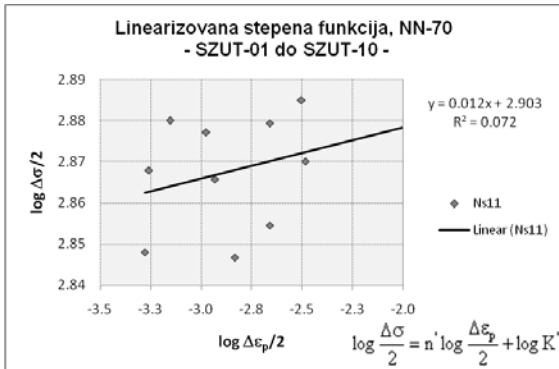


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.35$  do 0.80

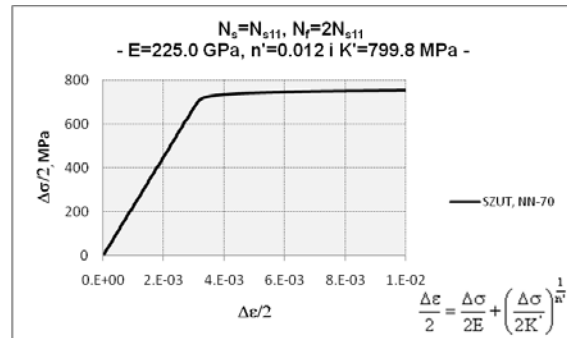


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

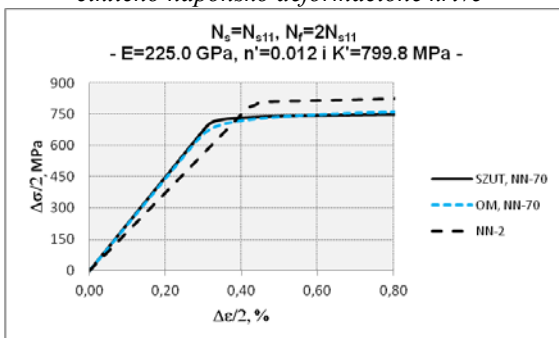
Slika 4.14. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, OM,  $N_f = N_s =$  sredina od ini. do pNDT



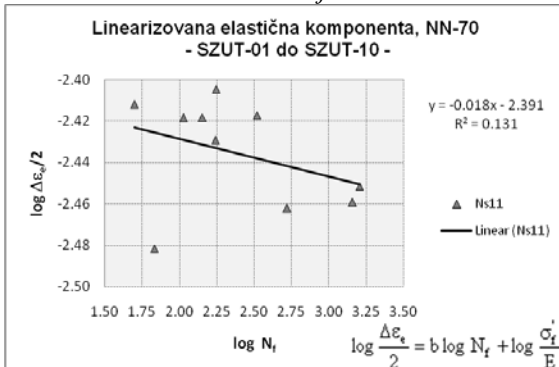
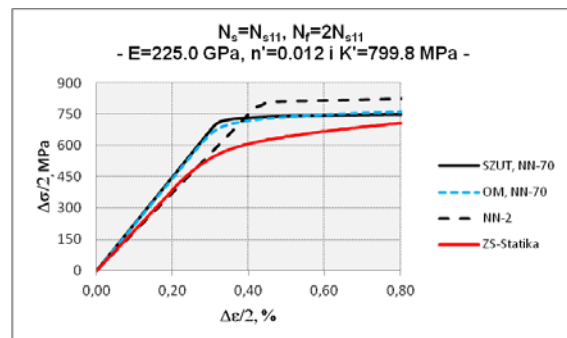
EkspONENT  $n' = 0.012$  i koeficijent  $\log K' = 2.903$  ciklično naponsko deformacione krive



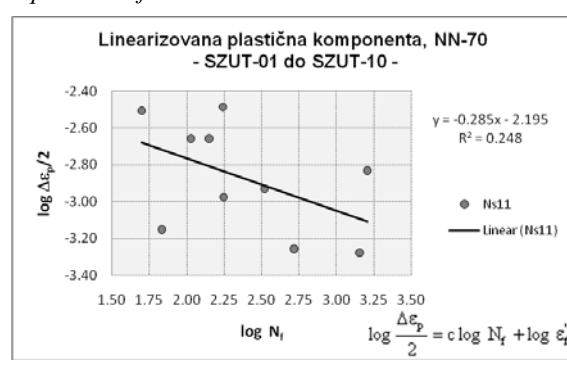
Ciklična naponsko deformaciona kriva



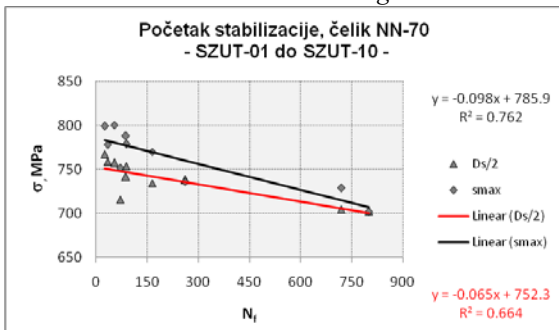
Poređenje cikličnih i monotoničkih naponsko deformacionih krivih



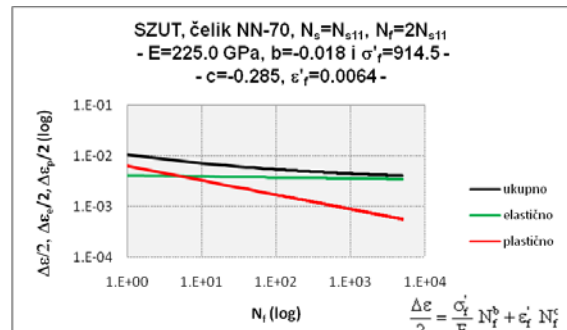
EkspONENT  $b = -0.018$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.391$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.285$  i koeficijent  $\log \epsilon_f' = -2.195$  osnovne krive niskocikličnog zamora

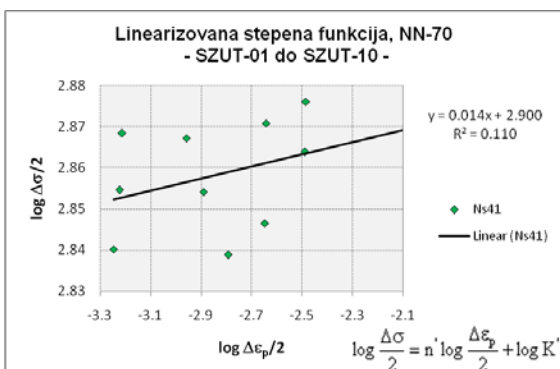


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta \sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta \epsilon/2 = 0.40$  do  $0.70$

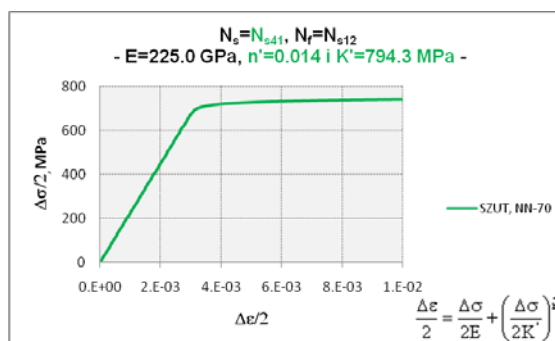


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

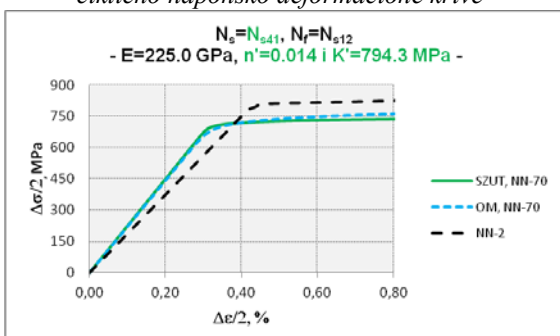
Slika 4.15. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_s =$  početak stabilizacije



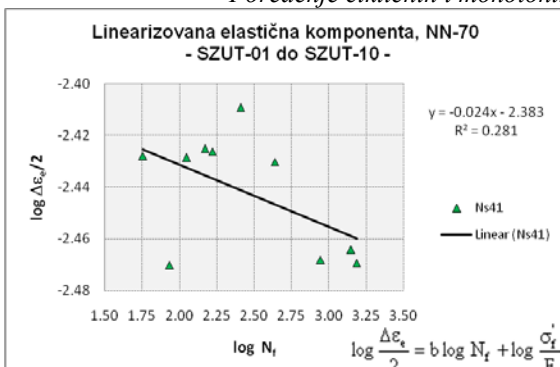
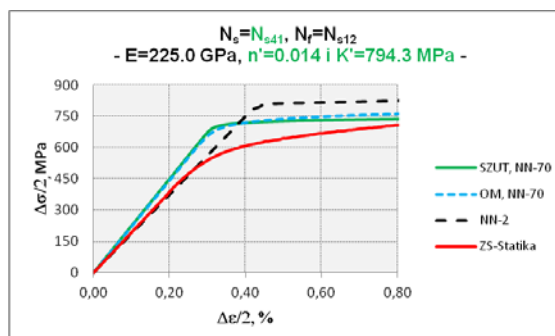
EkspONENT  $n' = 0.014$  i KOEFICIJENT  $\log K' = 2.900$  ciklično naponsko deformacione krive



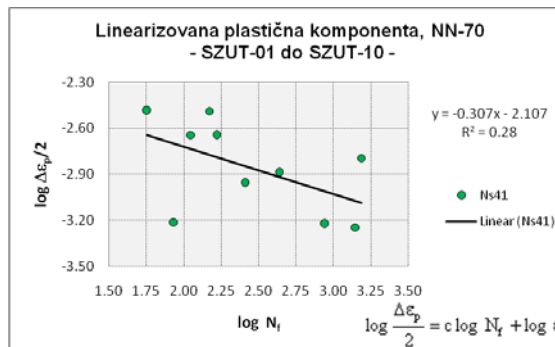
Ciklična naponsko deformaciona kriva



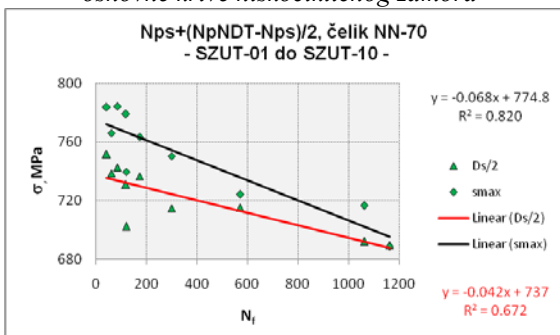
Poređenje cikličnih i monotonih naponsko deformacionih krivih



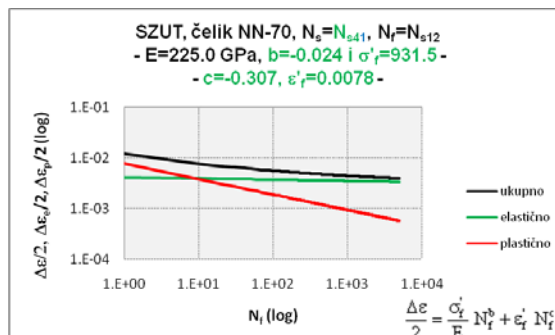
EkspONENT  $b = -0.024$  i koefICIJENT  $\log \frac{\sigma_f'}{E} = -2.383$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.307$  i koefICIJENT  $\log \epsilon_f' = -2.107$  osnovne krive niskocikličnog zamora



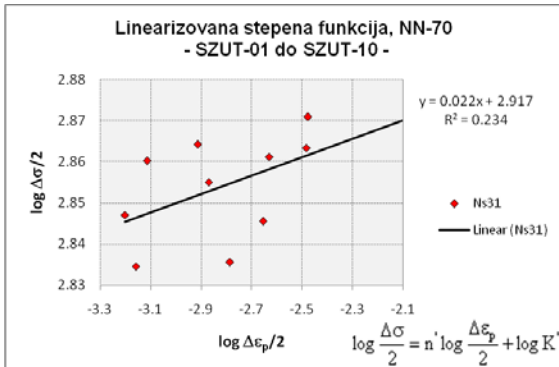
Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta \sigma / 2$  za nivo deformacije  $\Delta \epsilon / 2 = 0.40$  do  $0.70$



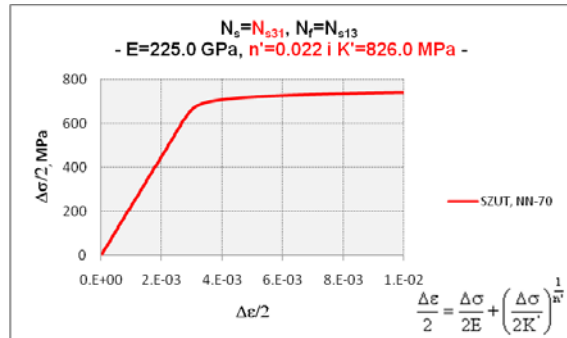
Osnovna kriva niskocikličnog zamora

Slika 4.16. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f =$  prag NDT

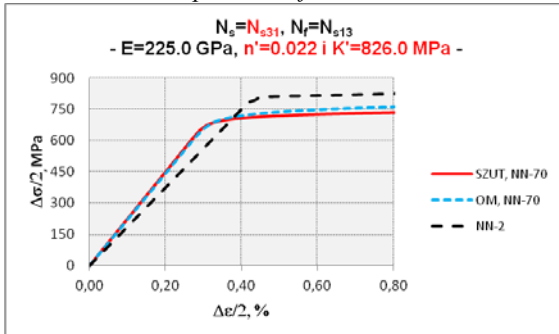




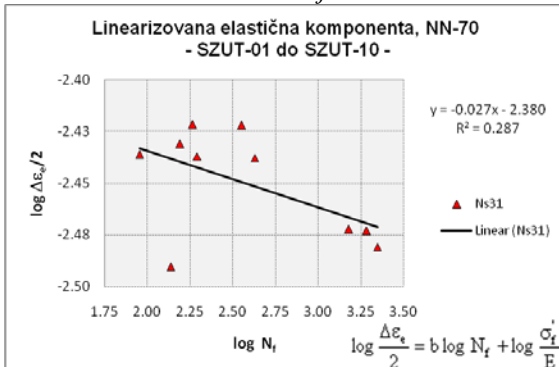
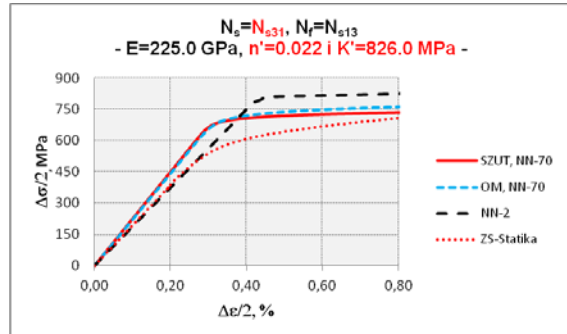
Eksponent  $n' = 0.022$  i koeficijent  $\log K' = 2.917$  ciklično naponsko deformacione krive



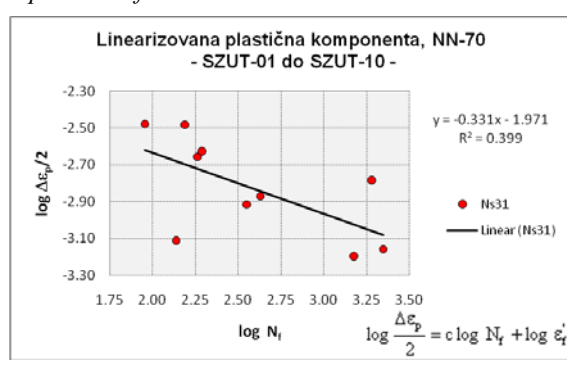
Ciklična naponsko deformaciona kriva



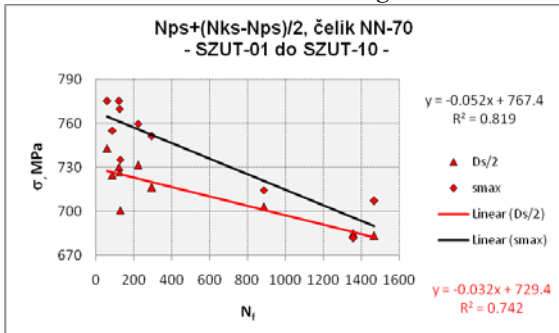
Poređenje cikličnih i monotonih naponsko deformacionih krivih



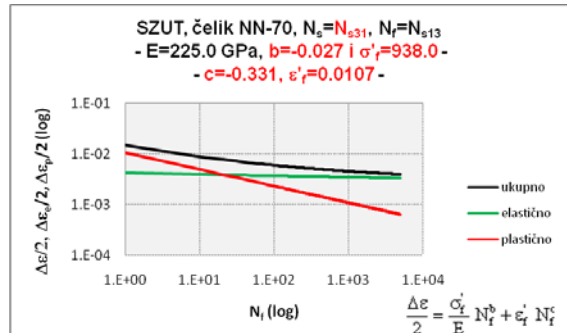
Eksponent  $b = -0.027$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.380$  osnovne krive niskocikličnog zamora



Eksponent  $c = -0.331$  i koeficijent  $\log \epsilon_f^c = -1.971$  osnovne krive niskocikličnog zamora

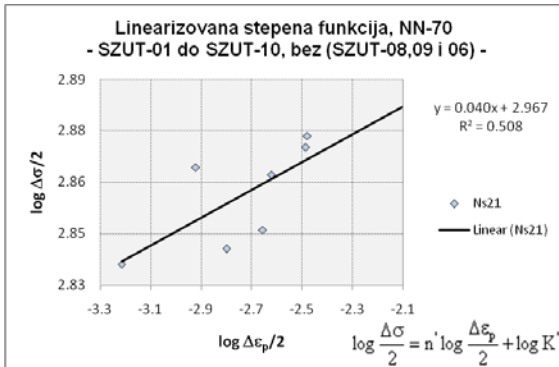


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.40$  do 0.70

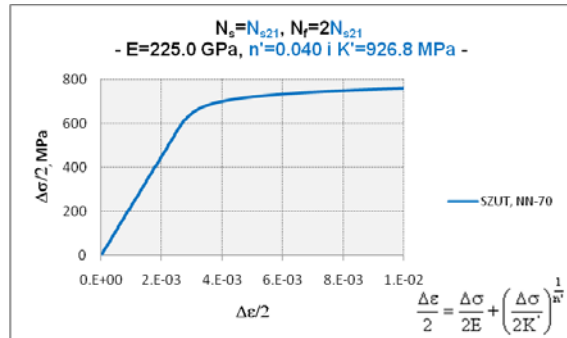


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

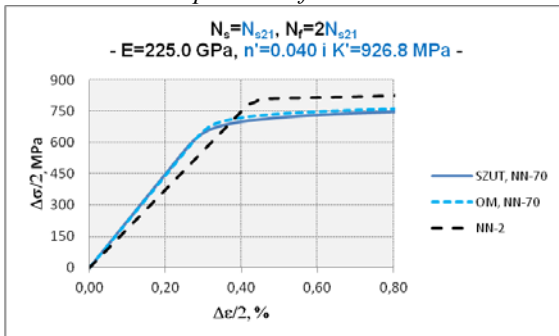
Slika 4.17. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f =$  kraj stabilizacije



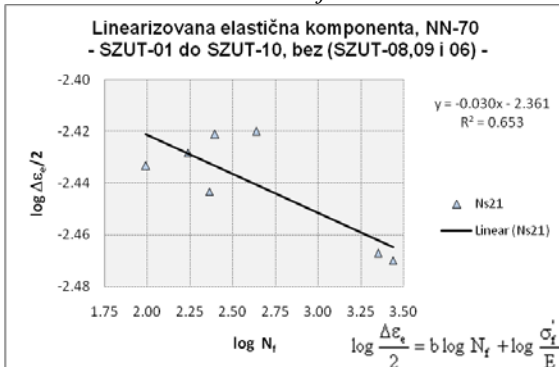
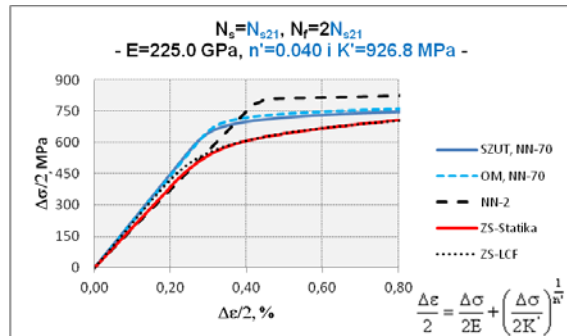
EkspONENT  $n' = 0.040$  I KOEFICIJENT  $\log K' = 2.967$  ciklično naponsko deformacione krive



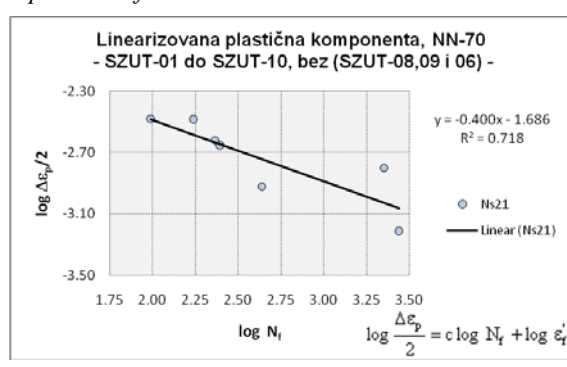
Ciklična naponsko deformaciona kriva



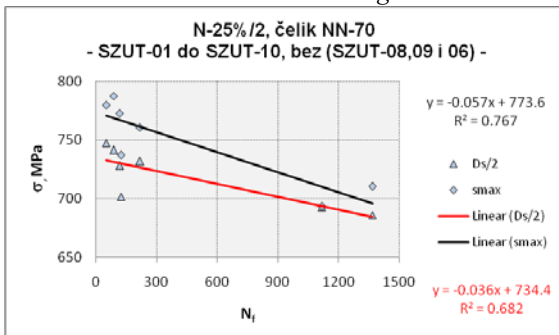
Poređenje cikličnih i monotoničkih naponsko deformacionih krivih



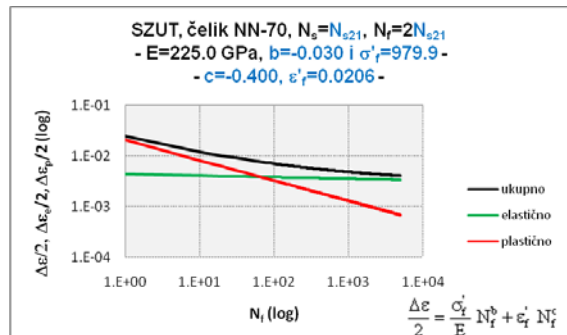
EkspONENT  $b = -0.030$  I KOEFICIJENT  $\log \sigma_f'/E = -2.361$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.400$  I KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -1.686$  osnovne krive niskocikličnog zamora

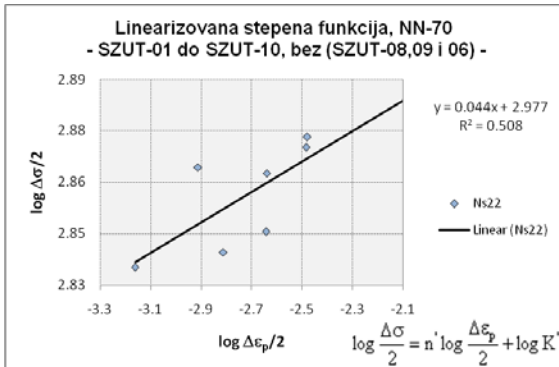


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.40$  do 0.70

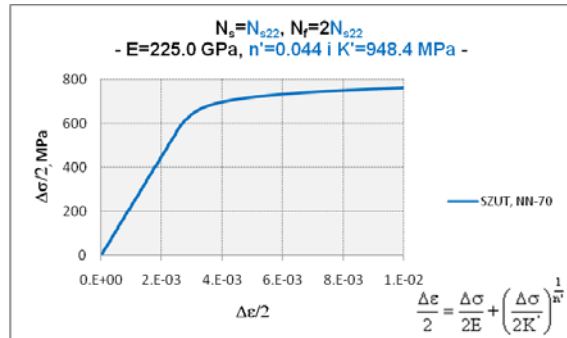


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

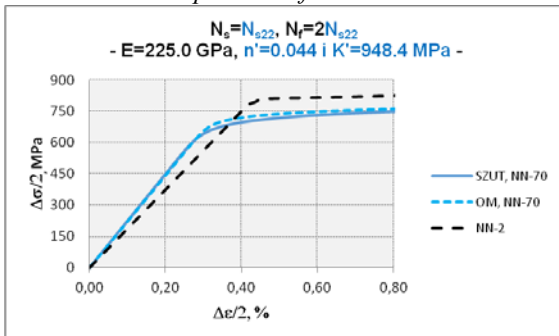
Slika 4.18. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f = \text{pad sile za } 25\%$



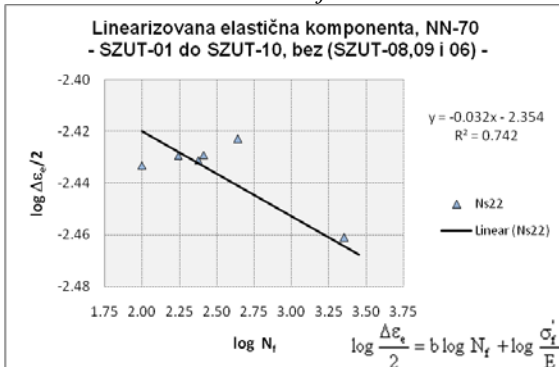
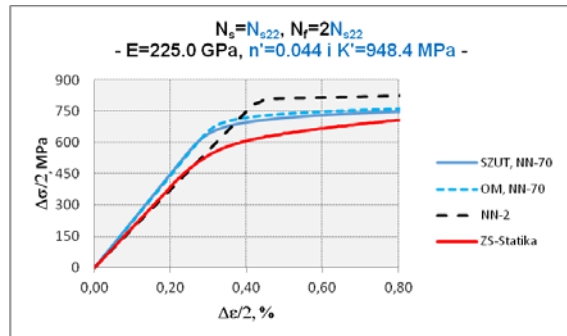
EkspONENT  $n' = 0.044$  I KOEFICIJENT  $\log K' = 2.977$  ciklično naponsko deformacione krive



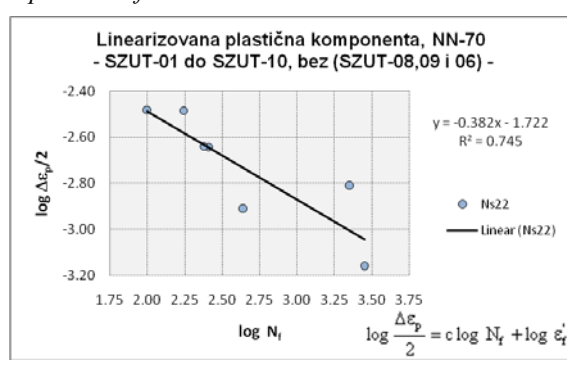
Ciklična naponsko deformaciona kriva



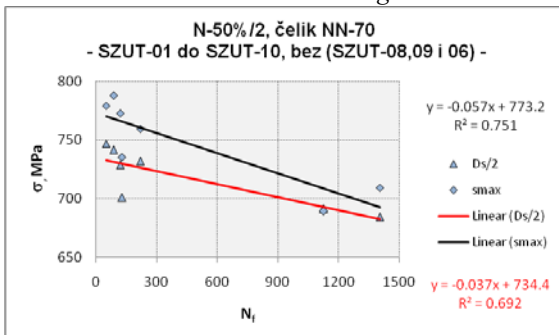
Poređenje cikličnih i monotonih naponsko deformacionih krivih



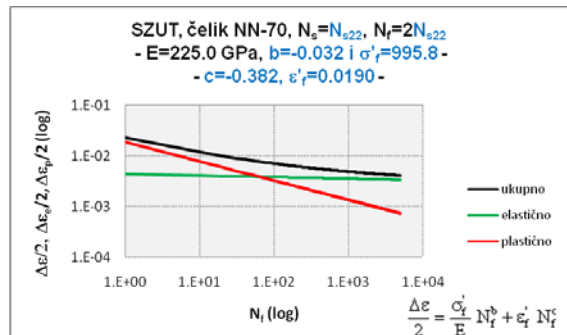
EkspONENT  $b = -0.032$  I KOEFICIJENT  $\log \sigma_f'/E = -2.354$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.382$  I KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -1.722$  osnovne krive niskocikličnog zamora

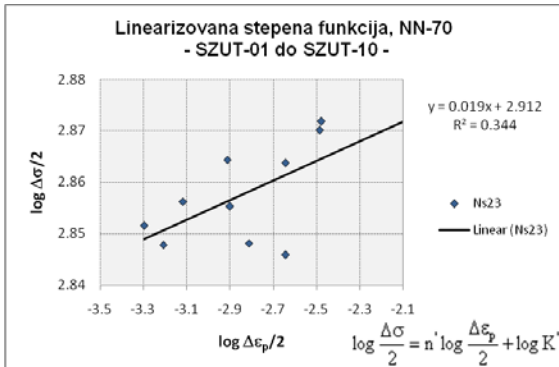


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.40$  do 0.70

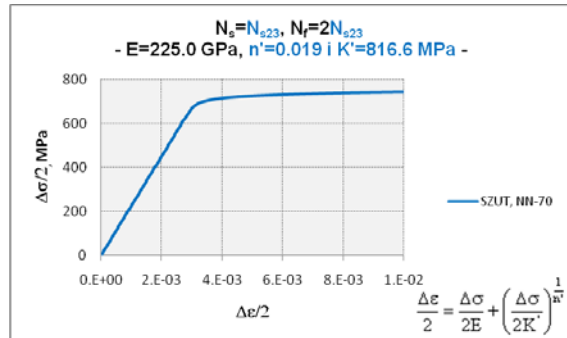


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

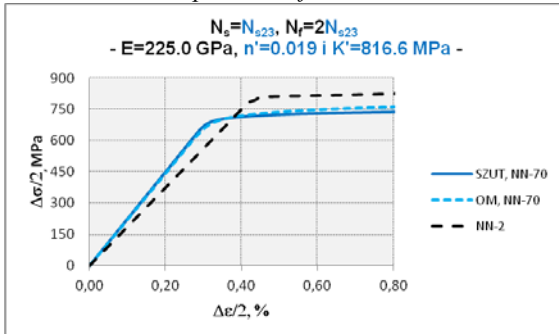
Slika 4.19. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f =$  pad sile za 50%



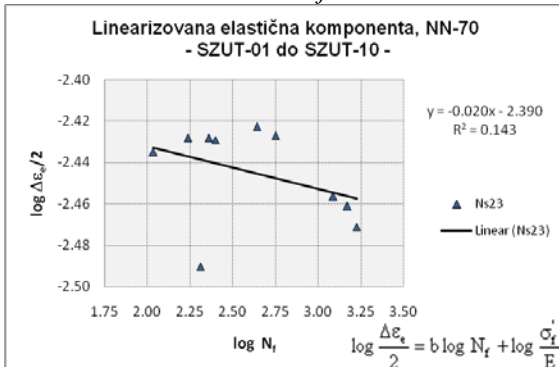
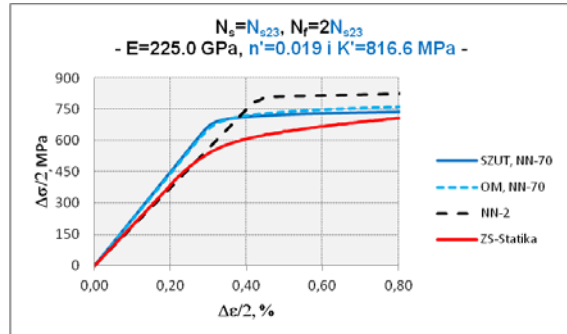
Eksponent  $n' = 0.019$  i koeficijent  $\log K' = 2.912$  ciklično naponsko deformacione krive



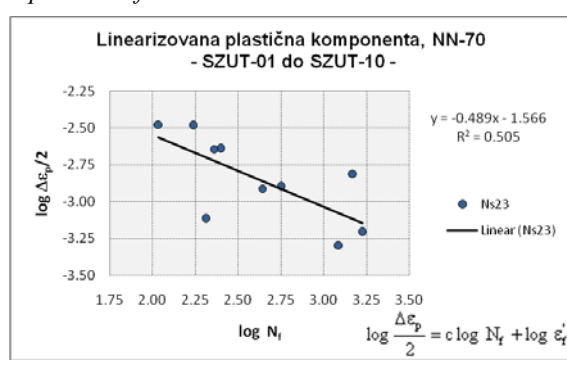
Ciklična naponsko deformaciona kriva



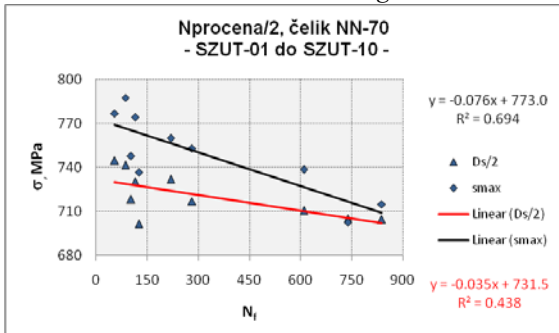
Poređenje cikličnih i monotonih naponsko deformacionih krivih



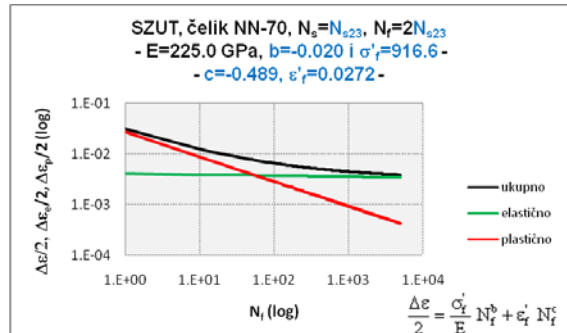
Eksponent  $b = -0.020$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.390$  osnovne krive niskocikličnog zamora



Eksponent  $c = -0.489$  i koeficijent  $\log \epsilon_f' = -1.566$  osnovne krive niskocikličnog zamora

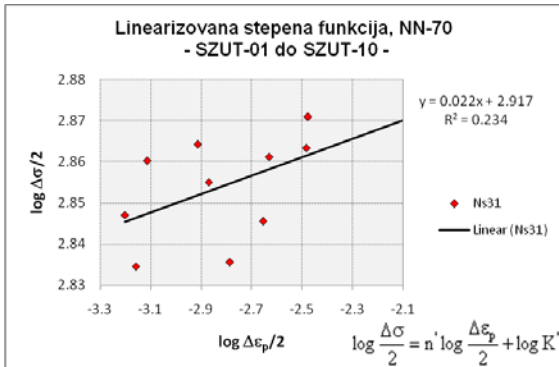


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta \sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta \epsilon/2 = 0.40$  do  $0.70$

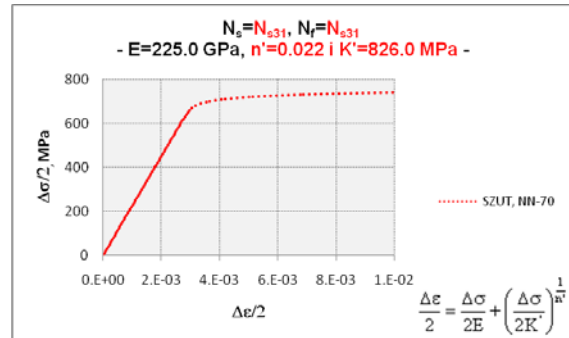


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

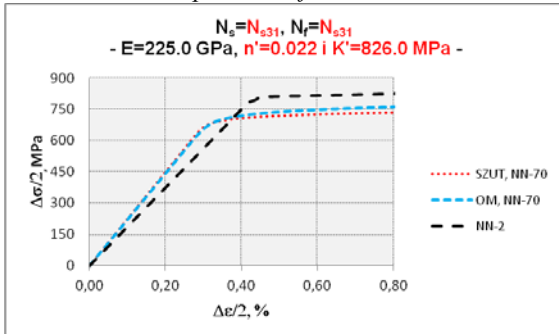
Slika 4.20. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f$  = procena na osnovu iskustva



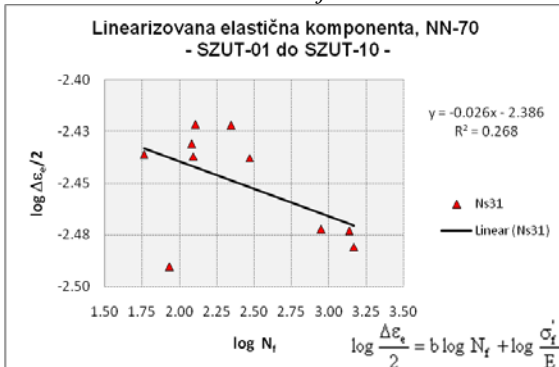
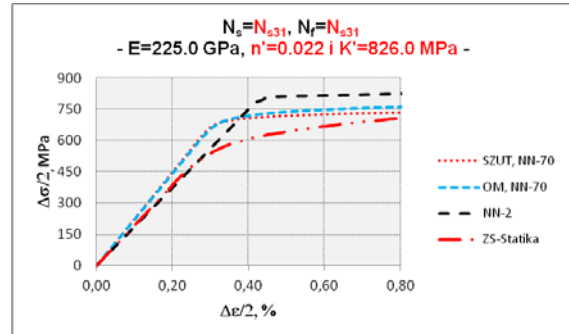
Eksponent  $n' = 0.022$  i koeficijent  $\log K' = 2.917$  ciklično naponsko deformacione krive



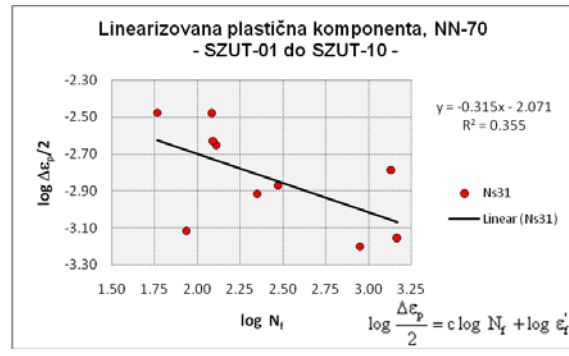
Ciklična naponsko deformaciona kriva



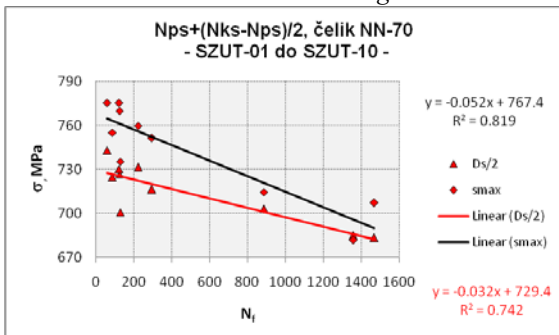
Poređenje cikličnih i monotonih naponsko deformacionih krivih



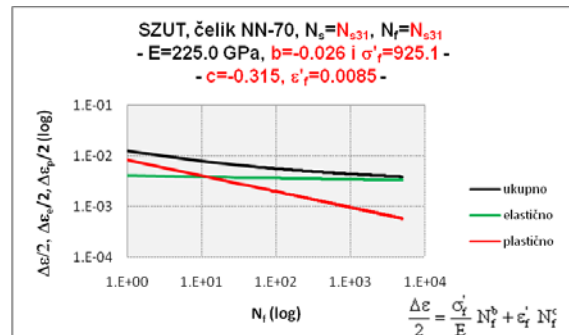
Eksponent  $b = -0.026$  i koeficijent  $\log \sigma_f'/E = -2.386$  osnovne krive niskocikličnog zamora



Eksponent  $c = -0.315$  i koeficijent  $\log \epsilon_f' = -2.071$  osnovne krive niskocikličnog zamora

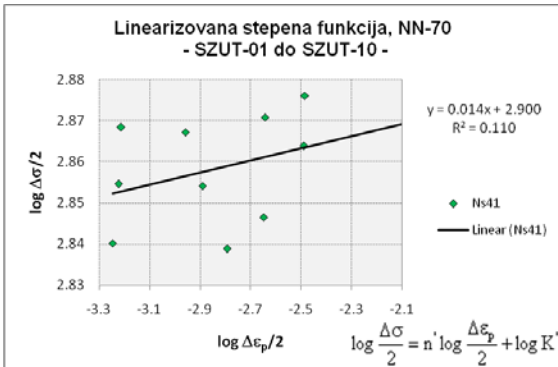


Odnos  $\sigma_{max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2=0.40$  do 0.70

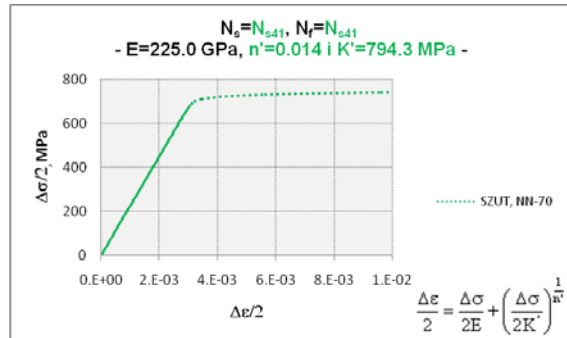


Osnovna kriva niskocikličnog zamora

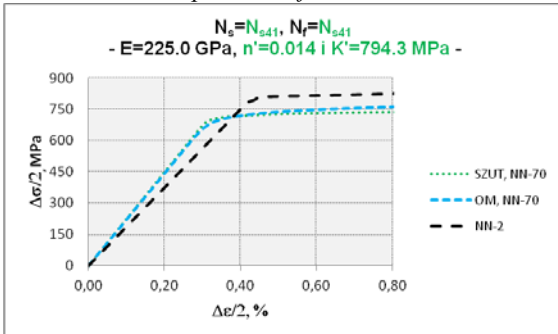
Slika 4.21. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f = N_s =$  sredina stabilizacije



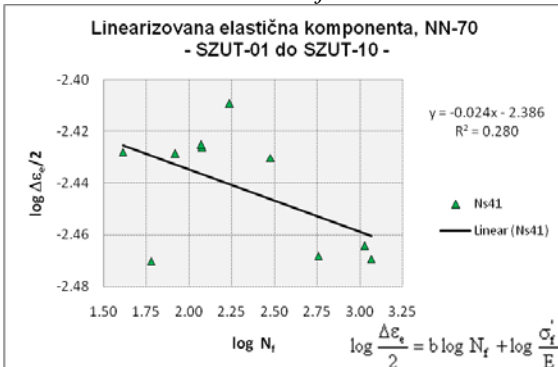
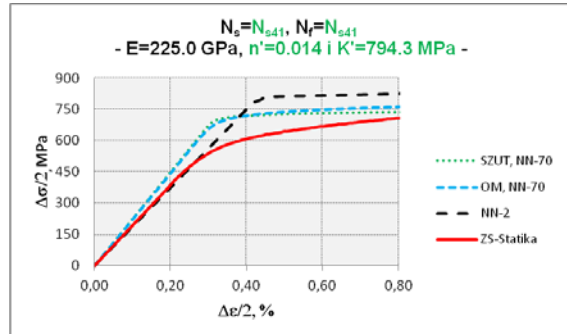
EkspONENT  $n' = 0.014$  I KOEFICIJENT  $\log K' = 2.900$  ciklično naponsko deformacione krive



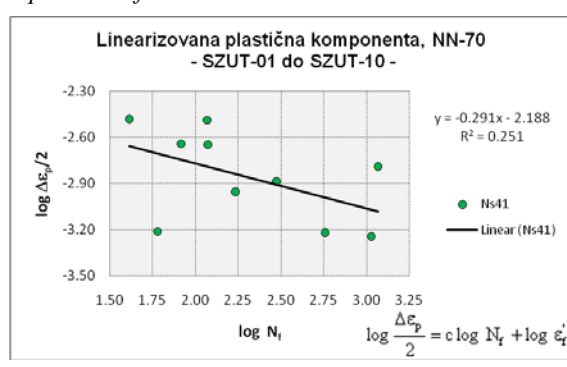
Ciklična naponsko deformaciona kriva



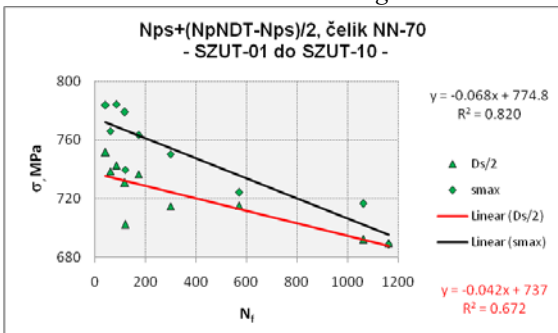
Poređenje cikličnih i monotoni naponsko deformacionih krivih



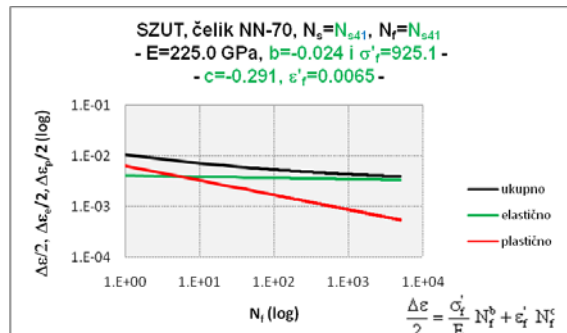
EkspONENT  $b = -0.024$  I KOEFICIJENT  $\log \sigma_f'/E = -2.386$  osnovne krive niskocikličnog zamora



EkspONENT  $c = -0.291$  I KOEFICIJENT  $\log \epsilon_f' = -2.188$  osnovne krive niskocikličnog zamora



Odnos  $\sigma_{max}$  I  $\Delta\sigma/2$  za nivo deformacije  $\Delta\epsilon/2 = 0.40$  do  $0.70$



Osnovna kriva niskocikličnog zamora

Slika 4.22. Konstruisanje CNDK i OKNCZ, SZUT,  $N_f = N_s =$  sredina od ini. do pNDT

#### 4.2.8. Grupisanje podataka CNDK i OKNCZ za odabrane histereze

U tabeli 4.6 (za OM) i 4.9 (za SZUT) prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti jednačine CNDK za sve odabrane stabilizovane histereze čelika NN-70.

U tabeli 4.7 (za OM) i 4.10 (za SZUT) prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti elastične komponente jednačine OKNCZ za sve odabrane stabilizovane histereze čelika NN-70.

U tabeli 4.8 (za OM) i 4.11 (za SZUT) prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti plastične komponente jednačine OKNCZ za sve odabrane stabilizovane histereze čelika NN-70.

Tabela 4.6. Eksponenti  $n'$  i koeficijenti  $K'$  CNDK, OM

OM	sl. 4.7 do 4.14		$n'$	log $K'$	$K'$ , MPa
	$N_f$	$N_s$			
NN-70	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>0.031</b>	2.954	<b>899.5</b>
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>0.031</b>	2.954	<b>899.5</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>0.032</b>	2.948	<b>887.2</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>0.047</b>	2.976	<b>946.2</b>
$N_{s21}=N_{-25\%/2}$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>0.047</b>	2.976	<b>946.2</b>
$N_{s22}=N_{-50\%/2}$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>0.045</b>	2.972	<b>937.6</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>0.048</b>	2.987	<b>970.5</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>0.047</b>	2.976	<b>946.2</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>0.032</b>	2.948	<b>887.2</b>
Linearizovana stepena funkcija			$\log \frac{\Delta\sigma}{2} = n' \log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \log K'$		
Ciklična naponsko deformaciona kriva			$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$		

Tabela 4.7. Eksponenti  $b$  i koeficijenti  $\sigma'_f$  elastične komponente OKNZ, OM

OM	sl. 4.7 do 4.14					$E_{sr0}$ , MPa	$E_{sr1}$ , MPa	$E=E_{sr}$ , MPa
	$N_f$	$N_s$	$b$	$\log \frac{\sigma'_f}{E_{sr}}$	$\sigma'_f/E_{sr}$	$\sigma'_{f0}$	$\sigma'_{f1}$	$\sigma'_f$
NN-70						223328	219427	<b>221378</b>
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.085</b>	-2.231	0.0059	1312.0	1289.1	<b>1300.6</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.065</b>	-2.291	0.0051	1142.7	1122.8	<b>1132.7</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.061</b>	-2.292	0.0051	1140.1	1120.2	<b>1130.1</b>
$N_{s21}=N_{-25\%/2}$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.060</b>	-2.283	0.0052	1164.0	1143.6	<b>1153.8</b>
$N_{s22}=N_{-50\%/2}$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.057</b>	-2.291	0.0051	1142.7	1122.8	<b>1132.7</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.061</b>	-2.280	0.0052	1172.0	1151.6	<b>1161.8</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.066</b>	-2.288	0.0052	1150.6	1130.6	<b>1140.6</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.070</b>	-2.289	0.0051	1148.0	1128.0	<b>1138.0</b>
Linearizovani deo elastične komponente			$\log \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma'_f}{E}$					
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c$					



Tabela 4.8. Eksponenti  $c$  i koeficijenti  $\epsilon'_f$  plastične komponente OKNCZ, OM

OM	sl. 4.7 do 4.14		$c$	$\log \epsilon'_f$	$\epsilon'_f$
	$N_f$	$N_s$			
<b>NN-70</b>	$N_f$	$N_s$			
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.872</b>	-0.654	<b>0.2218</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.695</b>	-1.055	<b>0.0881</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.564</b>	-1.213	<b>0.0612</b>
$N_{s21}=N_{.25\%}/2$	$N_{.25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.594</b>	-0.981	<b>0.1045</b>
$N_{s22}=N_{.50\%}/2$	$N_{.50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.620</b>	-0.903	<b>0.1250</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.574</b>	-1.114	<b>0.0769</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.613</b>	-1.192	<b>0.0643</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.738</b>	-1.043	<b>0.0906</b>
Linearizovani deo plastične komponente			$\log \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \epsilon'_f$		
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \epsilon'_f N_f^c$		

Tabela 4.9. Eksponenti  $n'$  i koeficijenti  $K'$  CNDK, SZUT

SZUT	sl. 4.15 do 4.22		$n'$	$\log K'$	$K', \text{MPa}$
	$N_f$	$N_s$			
<b>NN-70</b>	$N_f$	$N_s$			
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>0.012</b>	2.903	<b>799.8</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>0.014</b>	2.900	<b>794.3</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>0.022</b>	2.917	<b>826.0</b>
$N_{s21}=N_{.25\%}/2$	$N_{.25\%}$	$N_{s21}$	<b>0.040</b>	2.967	<b>926.8</b>
$N_{s22}=N_{.50\%}/2$	$N_{.50\%}$	$N_{s22}$	<b>0.044</b>	2.977	<b>948.4</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>0.019</b>	2.912	<b>816.6</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>0.022</b>	2.917	<b>826.0</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>0.014</b>	2.900	<b>794.3</b>
Linearizovana stepena funkcija			$\log \frac{\Delta \sigma}{2} = n' \log \frac{\Delta \epsilon_p}{2} + \log K'$		
Ciklična naponsko deformaciona kriva			$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$		

Tabela 4.10. Eksponenti **b** i koeficijenti  $\sigma'_f$  elastične komponente OKNCZ, SZUT

SZUT	sl. 4.15 do 4.22					$E_{sr0}$ , MPa	$E_{sr1}$ , MPa	$E=E_{sr}$ , MPa
	$N_f$	$N_s$	<b>b</b>	$\log \frac{\sigma'_f}{E_{sr}}$	$\sigma'_f/E_{sr}$	$\sigma'_{f0}$	$\sigma'_{f1}$	$\sigma'_f$
<b>NN-70</b>						225909	224100	<b>225005</b>
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.018</b>	-2.391	0.0041	918.2	910.8	<b>914.5</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.024</b>	-2.383	0.0041	935.3	927.8	<b>931.5</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.027</b>	-2.380	0.0042	941.7	934.2	<b>938.0</b>
$N_{s21}=N_{-25\%/2}$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.030</b>	-2.361	0.0044	983.9	976.0	<b>979.9</b>
$N_{s22}=N_{-50\%/2}$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.032</b>	-2.354	0.0044	999.8	991.8	<b>995.8</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.020</b>	-2.390	0.0041	920.3	912.9	<b>916.6</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.026</b>	-2.386	0.0041	928.8	921.4	<b>925.1</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.024</b>	-2.386	0.0041	928.8	921.4	<b>925.1</b>
Linearizovani deo elastične komponente			$\log \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma'_f}{E}$					
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c$					

Tabela 4.11. Eksponenti **c** i koeficijenti  $\varepsilon'_f$  plastične komponente OKNCZ, SZUT

SZUT	sl. 4.15 do 4.22		<b>c</b>	$\log \varepsilon'_f$	$\varepsilon'_f$
	$N_f$	$N_s$			
<b>NN-70</b>					
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.285</b>	-2.195	<b>0.0064</b>
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.307</b>	-2.107	<b>0.0078</b>
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.331</b>	-1.971	<b>0.0107</b>
$N_{s21}=N_{-25\%/2}$	$N_{-25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.400</b>	-1.686	<b>0.0206</b>
$N_{s22}=N_{-50\%/2}$	$N_{-50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.382</b>	-1.722	<b>0.0190</b>
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.489</b>	-1.566	<b>0.0272</b>
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.315</b>	-2.071	<b>0.0085</b>
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.291</b>	-2.188	<b>0.0065</b>
Linearizovani deo plastične komponente			$\log \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \varepsilon'_f$		
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c$		

#### 4.2.9. Određivanje prelaznog veka

U tabelama 4.12 (za OM) i 4.13 (za SZUT) izračunat je prelazni vek za čelik NN-70, na osnovu parametara određenih prema raznim metodama za određivanje stabilizovane histereze. On predstavlja ciklus u kome su izjednačene vrednosti elastičnih i plastičnih deformacija na osnovnoj krivoj niskocikličnog zamora. Posle tog ciklusa vrednost plastične komponente se smanjuje u ukupnoj vrednosti deformacije.

Tabela 4.12. Prelazni vek za razne stabilizovane histereze, OM

OM	E, MPa	221378	elastični deo		plastični deo		
NN-70	$N_f$	$N_s$	<b>b</b>	$\sigma'_f$	<b>c</b>	$\epsilon'_f$	$N_{fT}$
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.085</b>	<b>1300.6</b>	<b>-0.872</b>	<b>0.2218</b>	101
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.065</b>	<b>1132.7</b>	<b>-0.695</b>	<b>0.0881</b>	92
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.061</b>	<b>1130.1</b>	<b>-0.564</b>	<b>0.0612</b>	140
$N_{s21}=N_{.25\%}/2$	$N_{.25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.06</b>	<b>1153.8</b>	<b>-0.594</b>	<b>0.1045</b>	274
$N_{s22}=N_{.50\%}/2$	$N_{.50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.057</b>	<b>1132.7</b>	<b>-0.62</b>	<b>0.125</b>	292
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.061</b>	<b>1161.8</b>	<b>-0.574</b>	<b>0.0769</b>	187
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.066</b>	<b>1140.6</b>	<b>-0.613</b>	<b>0.0643</b>	101
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.070</b>	<b>1138.0</b>	<b>-0.738</b>	<b>0.0906</b>	73
Prelazni vek			$N_{fT} = \left( \frac{\epsilon'_f \cdot E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}}$				

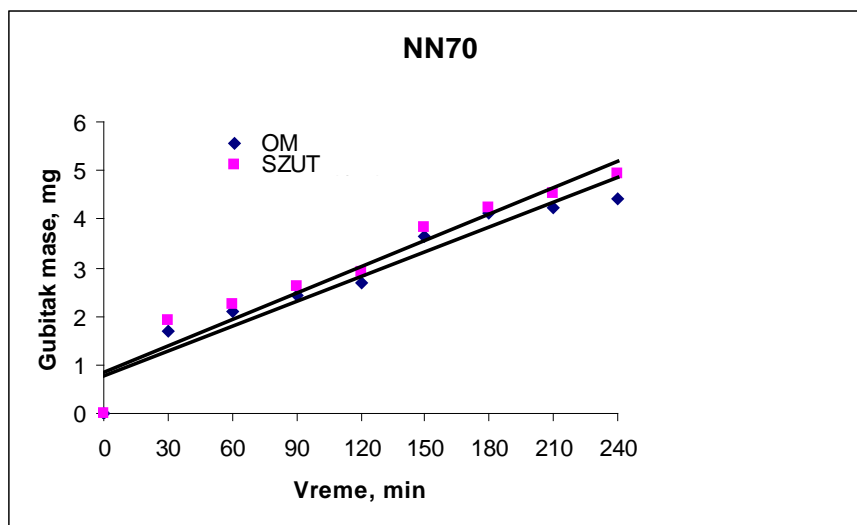
Tabela 4.13. Prelazni vek za razne stabilizovane histereze, SZUT

SZUT	E, MPa	225005	elastični deo		plastični deo		
NN-70	$N_f$	$N_s$	<b>b</b>	$\sigma'_f$	<b>c</b>	$\epsilon'_f$	$N_{fT}$
$N_{s11}=N_{ps}$	$2 N_{s11}$	$N_{s11}$	<b>-0.018</b>	<b>914.5</b>	<b>-0.285</b>	<b>0.0064</b>	5
$N_{s12}=N_{pNDT}$	$N_{s12}$	$N_{s41}$	<b>-0.024</b>	<b>931.5</b>	<b>-0.307</b>	<b>0.0078</b>	9
$N_{s13}=N_{ks}$	$N_{s13}$	$N_{s31}$	<b>-0.027</b>	<b>938.0</b>	<b>-0.331</b>	<b>0.0107</b>	22
$N_{s21}=N_{.25\%}/2$	$N_{.25\%}$	$N_{s21}$	<b>-0.030</b>	<b>979.9</b>	<b>-0.400</b>	<b>0.0206</b>	67
$N_{s22}=N_{.50\%}/2$	$N_{.50\%}$	$N_{s22}$	<b>-0.032</b>	<b>995.8</b>	<b>-0.382</b>	<b>0.0190</b>	64
$N_{s23}=N_{procena}/2$	$N_{procena}$	$N_{s23}$	<b>-0.020</b>	<b>916.6</b>	<b>-0.489</b>	<b>0.0272</b>	57
$N_{s31}=N_{ps}+(N_{ks}-N_{ps})/2$	$N_{s31}$	$N_{s31}$	<b>-0.026</b>	<b>925.1</b>	<b>-0.315</b>	<b>0.0085</b>	12
$N_{s41}=N_{ps}+(N_{pNDT}-N_{ps})/2$	$N_{s41}$	$N_{s41}$	<b>-0.024</b>	<b>925.1</b>	<b>-0.291</b>	<b>0.0065</b>	6
Prelazni vek			$N_{fT} = \left( \frac{\epsilon'_f \cdot E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}}$				

### 4.3. Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije

#### 4.3.1. Otpornost materijala na dejstvo kavitacije - kavitaciona brzina

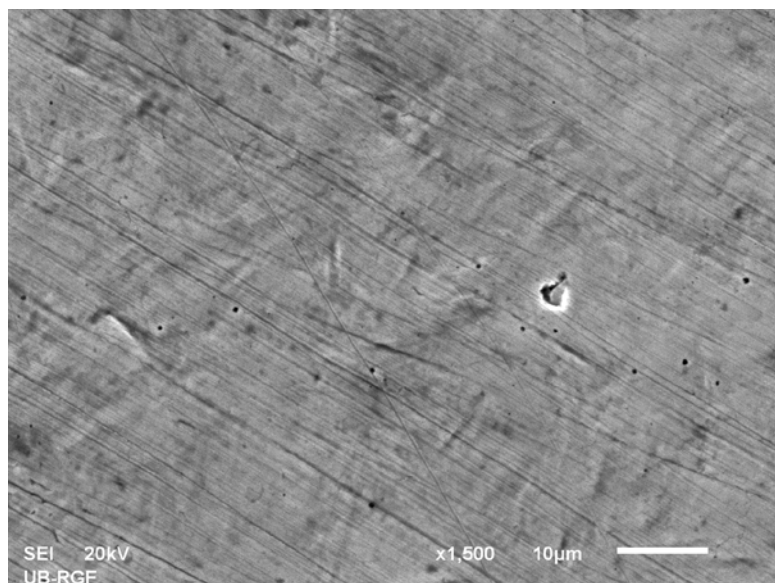
Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimirane su pravcem čiji tangens ugla nagiba predstavlja gubitak mase u periodu vremena delovanja kavitacije i predstavlja kavitacionu brzinu, sl. 4.23.



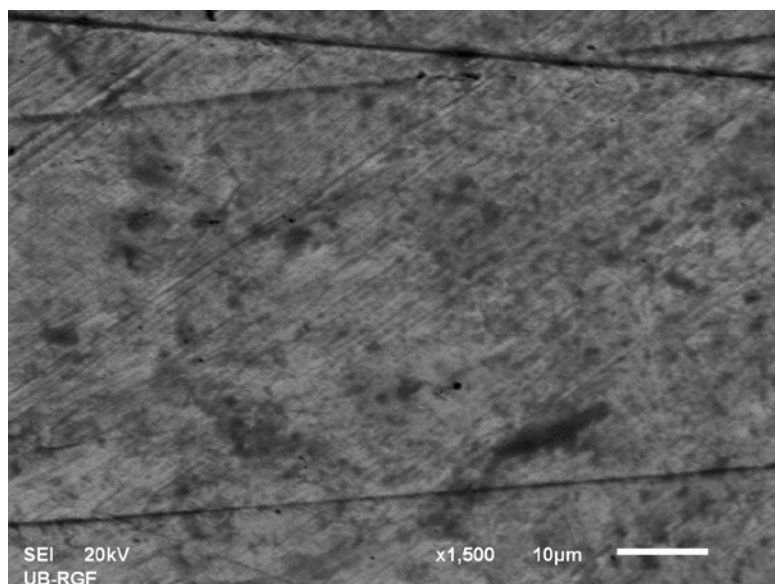
Slika 4.23. Dijagram promene kavitacione brzine ispitivanih uzoraka OM i SZUT, čelika NN-70

#### 4.3.2. Morfologija oštećenja uzorka OM izloženog dejstvu kavitacije

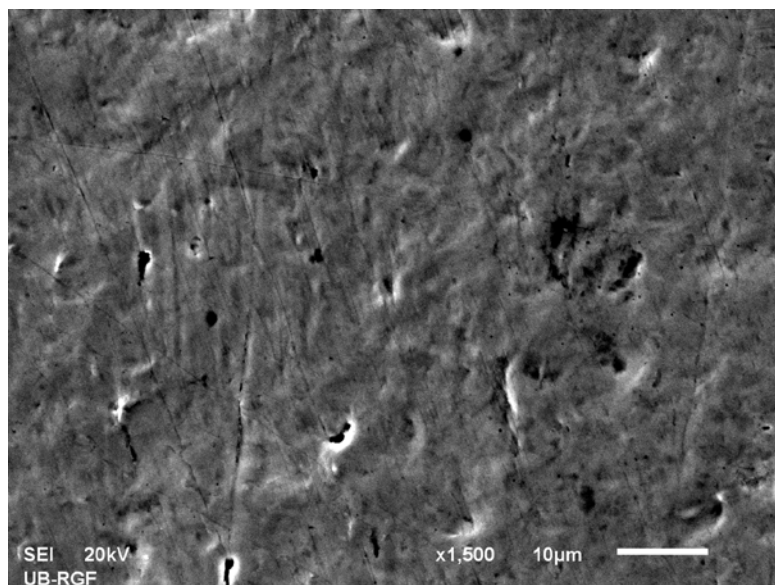
Sken elektronska mikroskopija (SEM) oštećenja površine uzorka OM izloženog dejstvu kavitacije u trajanju od 30, 60, 90, 120, 180 i 240 minuta prikazana je na slikama 4.24 do 4.30.



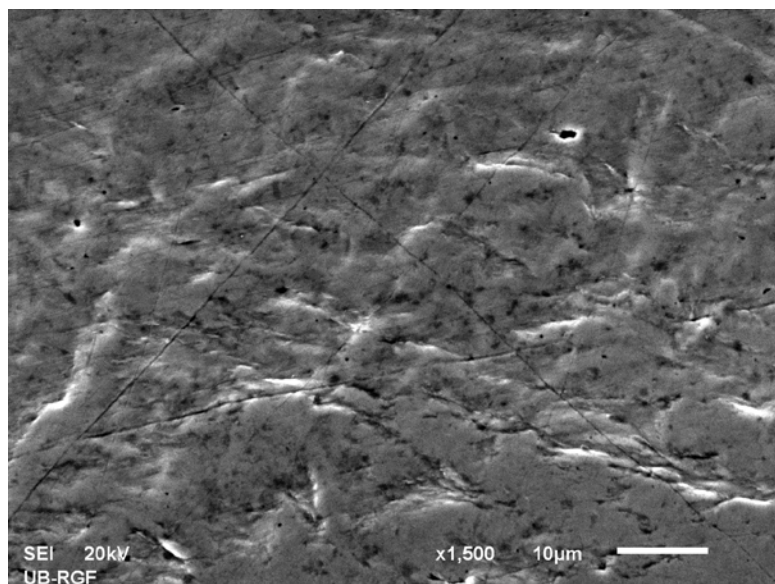
*Slika 4.24. Morfologija površine uzorka OM, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 30 minuta*



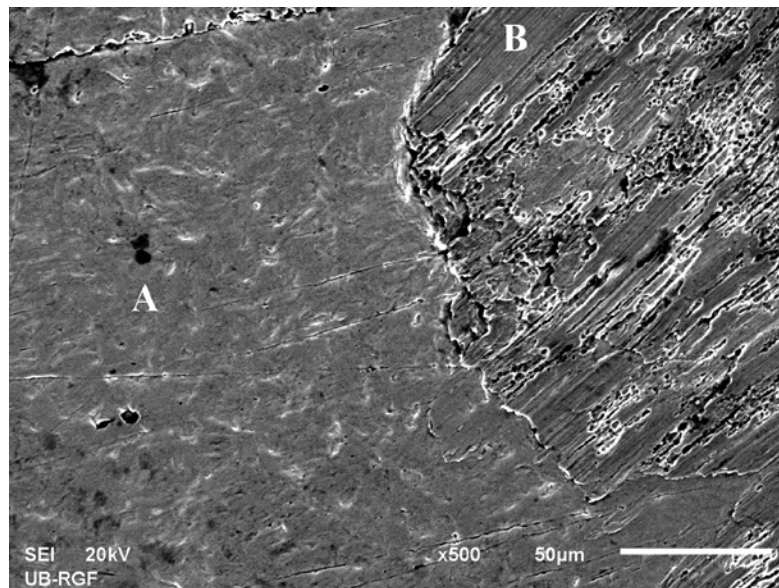
*Slika 4.25. Morfologija površine uzorka OM, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 60 minuta*



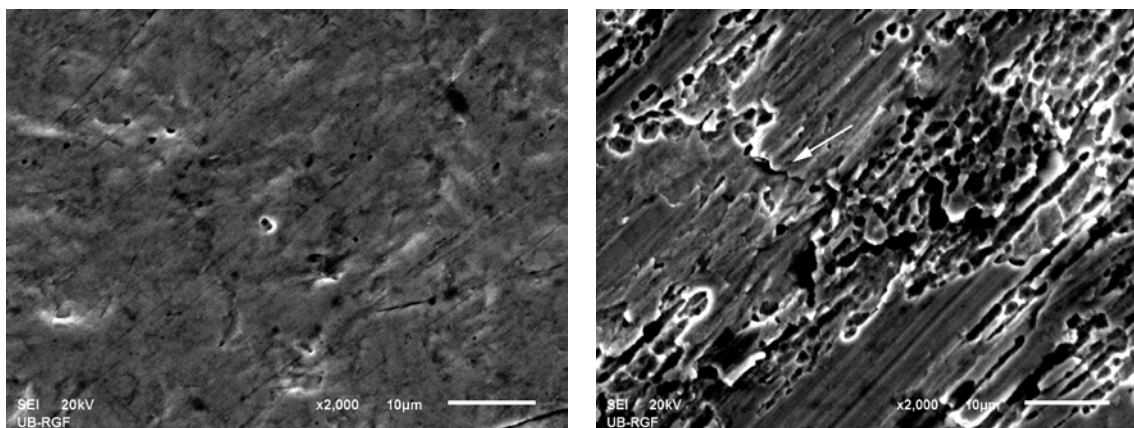
*Slika 4.26. Morfologija površine uzorka OM, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 90 minuta*



*Slika 4.27. Morfologija površine uzorka OM, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 120 minuta*



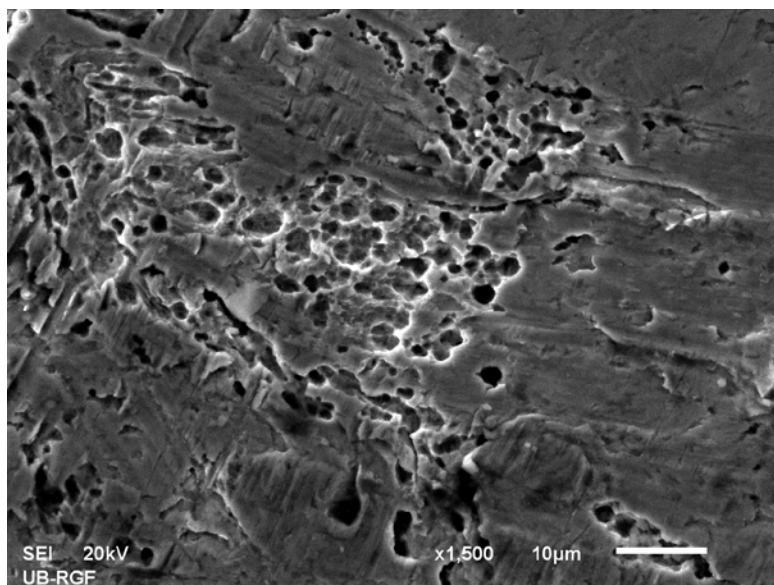
*Slika 4.28. Morfologija površine uzorka OM, čelika NN-70, zone sa dve različite morfologije A i B, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 180 minuta*



*a) Zona A*

*b) Zona B*

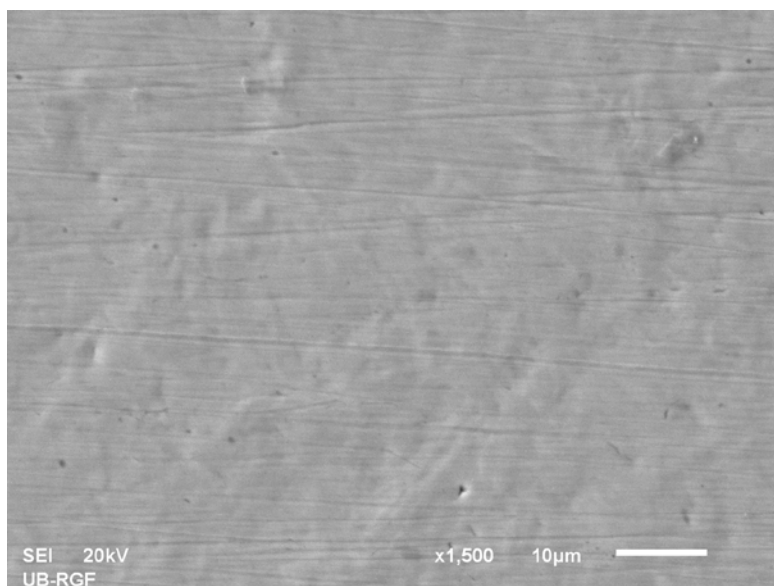
*Slika 4.29. Različita morfologija a) zona A i b) zona B istog uzorka posle 180 min izlaganja dejstvu kavitacije*



*Slika 4.30. Morfologija površine uzorka OM, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 240 minuta*

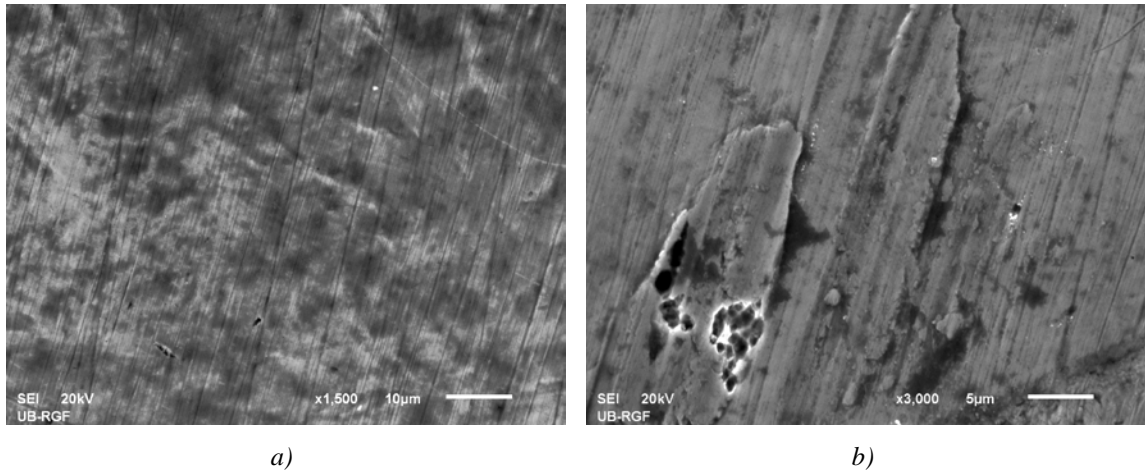
#### 4.3.3. Morfologija oštećenja uzorka SZUT izloženog dejstvu kavitacije

Sken elektronska mikroskopija (SEM) oštećenja površine uzorka SZUT izloženih dejstvu kavitacije u trajanju od 30, 60, 90, 120, 180 i 240 minuta prikazana je na slikama 4.31 do 4.36.

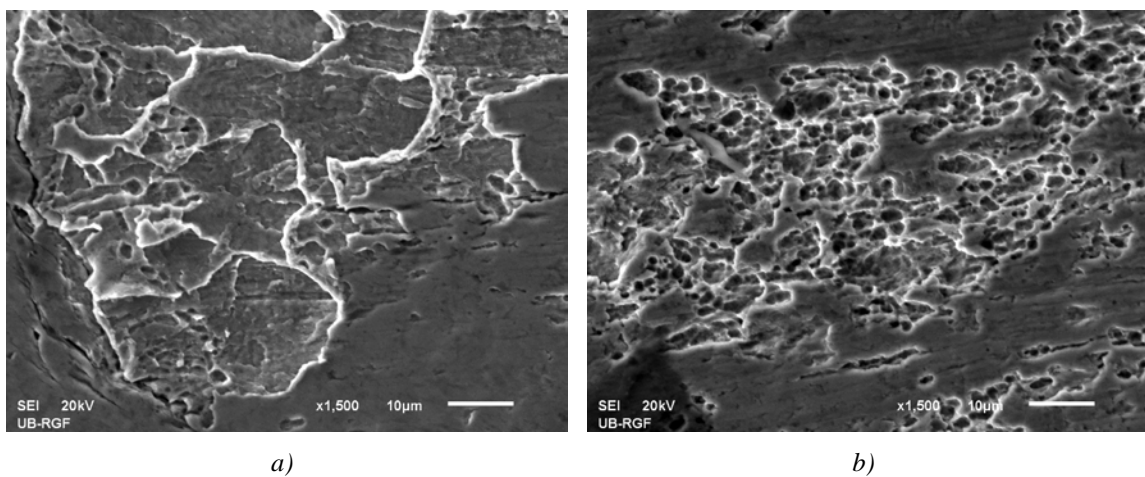


*Slika 4.31. Morfologija površine uzorka SZUT, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 30 minuta*

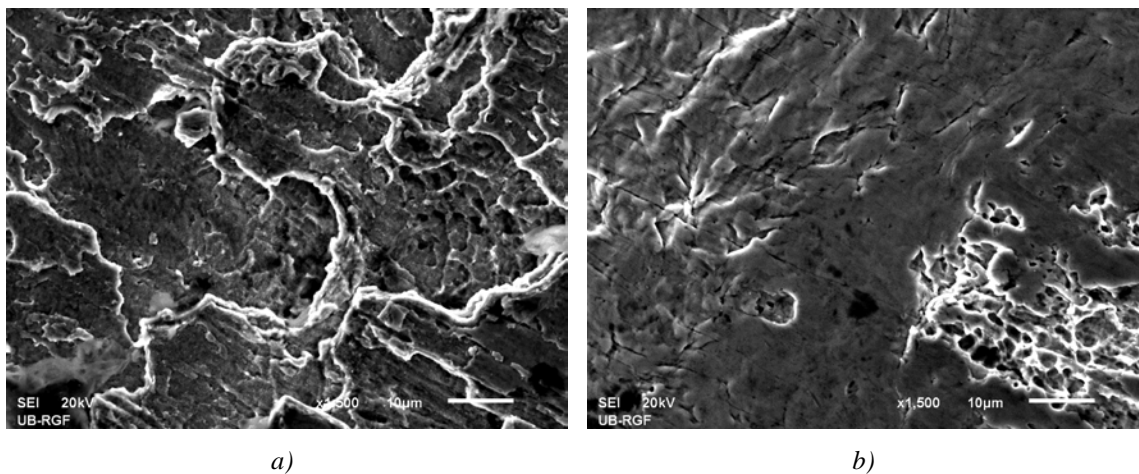




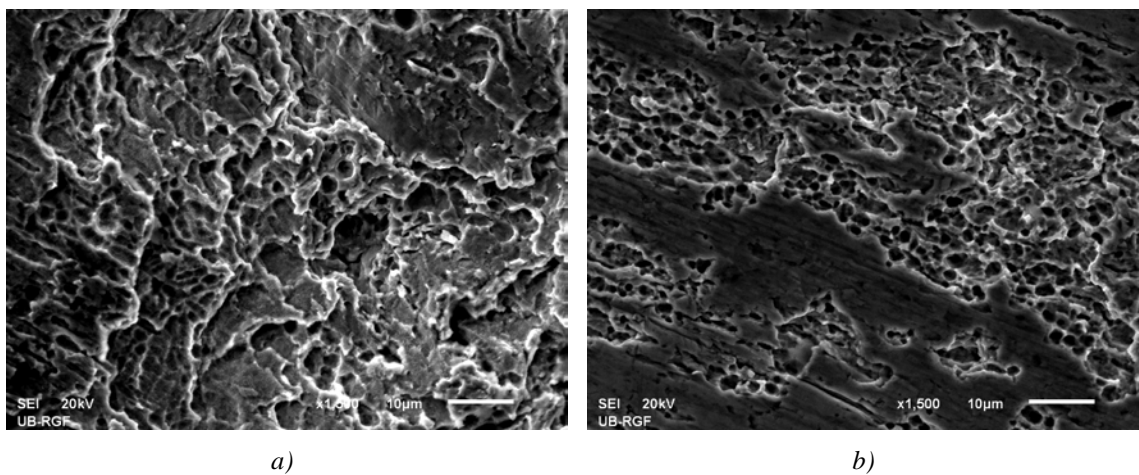
*Slika 4.32. Morfologija površine uzorka SZUT, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 60 minuta*



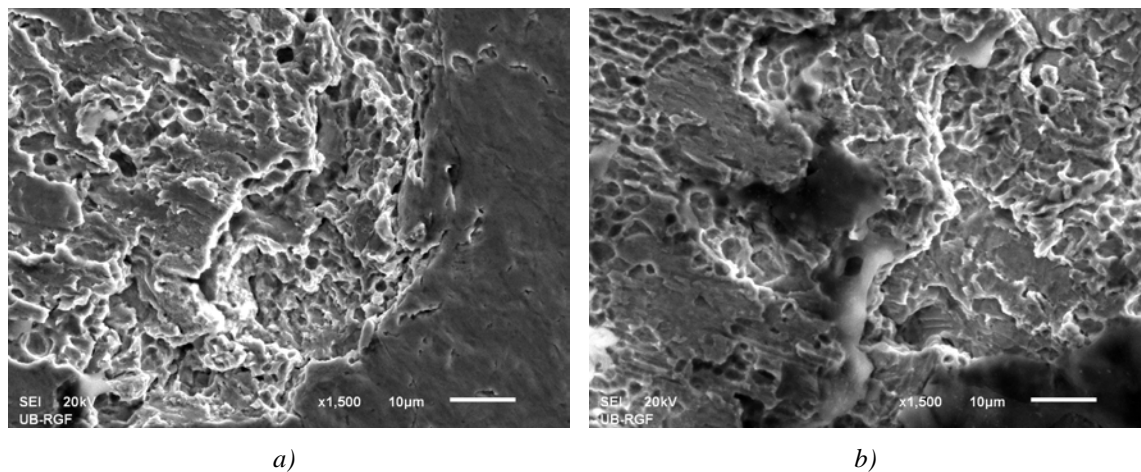
*Slika 4.33. Morfologija površine uzorka SZUT, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 90 minuta*



*Slika 4.34. Morfologija površine uzorka SZUT, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 120 minuta*



*Slika 4.35. Morfologija površine uzorka SZUT, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 180 minuta*



*Slika 4.36. Morfologija površine uzorka SZUT, čelika NN-70, vreme izlaganja dejstvu kavitacije: 240 minuta*

## Poglavlje 5

### 5. ANALIZE I DISKUSIJA

U okviru ovog poglavlja analizirani su i sumirani rezultati sledećih ispitivanja:

- pripremnih ispitivanja sa naglaskom na udarnim ispitivanjima u cilju određivanja režima simulacije ZUT i određivanja PTK OM i SZUT,
- ispitivanja NCZ i
- ispitivanja kavitacione otpornosti.

#### 5.1. Analiza rezultata pripremnih ispitivanja

Ispitivanjima metodama bez razaranja (IBR) ploče, namenjene za izradu epruveta za udarna ispitivanja (UI), ispitivanja niskocikličnim zamorom (NCZ) i ispitivanja otpornosti na kavitaciju (ONK), nisu utvrđene greške tipa prsline i/ili drugi nedostaci koji bi mogli da utiču na rezultate UI, ispitivanja NCZ i ispitivanja ONK. Na površini ploče izmerena je vrednost tvrdoće od 245 do 269 HV30, tab.P4.2 i sl.P4.1, Priloga 4.

U Prilogu 5 radi uporedne analize prikazani su rezultati hemijskog sastava čelika NN-70 iz različitih izvora.

Analizirajući hemijski sastav čelika ploče za izradu epruveta za navedena ispitivanja može se videti da on odgovara nazivnom hemijskom sastavu čelika NN-70, tab.P5.1, Priloga 5.

U Prilogu 6 radi uporedne analize prikazani su rezultati zateznih karakteristika čelika NN-70 iz različitih izvora.

Analizom je utvrđeno da zatezne karakteristike čelika ploče za izradu epruveta za navedena ispitivanja odgovaraju zateznim karakteristikama čelika NN-70, tab.P6.1, Priloga 6 i sl.P7.1, Priloga 7.

Na pripremcima za izbor režima simulacije ZUT izmerena je vrednost tvrdoće od 384 do 407 HV10 za  $\Delta t_{8/5} = 8$  s, 338 do 366 HV10 za  $\Delta t_{8/5} = 10$  s, 352 do 364 HV10 za  $\Delta t_{8/5} = 20$  s i 270 do 280 HV10 za  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, tab.P9.1, P9.2 i sl.P9.1, Priloga 9.

Ovi rezultati su u skladu sa prethodno objavljenim rezultatima drugih istraživača [13, 82], gde je utvrđeno da

1. “Kao i kod promene tvrdoće kroz presek zavarenih spojeva CTS, Y ili krstaste probe, tako i u slučajevima sučeonog spoja 2/3 X šav, nezavisno od ispitivane kombinacije šarža - dodatni materijal primećen je skok tvrdoće u zoni uticaja toplote, neposredno uz liniju spoja. Maksimalne vrednosti tvrdoće se kreću između **320 - 360 HV30.**” [13] i
2. “Uočava se primetan skok tvrdoće na liniji OM-ZUT-MŠ, sučeonog spoja K šava. Vidi se da je tvrdoća MŠ veća od izmerenih tvrdoća ZUT i OM. Preciznije, izmerena tvrdoća MŠ se kretala od 288 do 294 HV10, dok kod ZUT se kretala od **269 do 277 HV10** i kod OM od 252 do 262 HV10.” [82]

Polinomska zavisnost tvrdoća HV10/30 i vremena hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ , sl.P10.1, Priloga 10, pokazuje da tvrdoće odabranog režima simulacije ZUT, za  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, odgovaraju vrednostima tvrdoća realnog ZUT za šaržu 1. Uspostavljena polinomska zavisnost, sa korelacijom od preko 0.9, omogućava nam da na osnovu poznate i/ili potrebne vrednosti tvrdoće ZUT realnog zavarenog spoja odredimo vreme hlađenja  $\Delta t_{8/5}$  i na taj način utičemo na dobijanje karakteristika zavarenog spoja onakvih kakve nama odgovaraju.

Pri analizi mikrostrukture, prelaz OM-SZUT nije jasno uočen.

### 5.1.1. Analiza rezultata udarnih ispitivanja

Analizirani su rezultati udarnih ispitivanja u cilju izbora režima simulacije ZUT, za  $\Delta t_{8/5} = 8, 10, 20$  i 40 s. Takođe, analizirani su rezultati za usvojeni režim simulacije ZUT, za  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, u cilju određivanja temperature nulte plastičnosti SZUT, kao i rezultati određivanja temperature nulte plastičnosti OM čelika NN-70.

#### 5.1.1.1. Analiza rezultata u cilju izbora režima simulacije ZUT

Analizom dijagrama, sl. P9.2 i P9.3, Priloga 9, za SZUT sa vremenima hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 8, 10, 20$  i  $40$  s i vrednosti u tabeli P9.3 do P9.5, Priloga 5, primećuje se da je ukupna energija udara najmanja kod uzoraka sa vremenom hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 10$  s, i iznosi oko 36 J, s tim što je za stvaranje prsline potrebno oko 19 J, a za širenje oko 17 J, dok je najveća kod uzoraka sa vremenom hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, a iznosi oko 60 J, od toga za stvaranje prsline potrebno je oko 25 J, a za širenje oko 35 J. Primećuje se da je sa porastom vremena hlađenja,  $\Delta t_{8/5}$ , potrebna veća energija za širenje prsline (materijal je žilaviji) dok je energija stvaranja prsline približno ista i iznosi od 19 do 25 J. Ovo se povezuje sa strukturama sa KH dijagrama, sl. 2.1, koje se lakše deformišu.

#### 5.1.1.2. Analiza rezultata određivanja PTK OM i SZUT

Analizom dijagrama, sl. P11.1 do P11.4, Priloga 11, za OM i SZUT i vrednosti u tabeli P11.1 do P11.5, Priloga 11, primećuje se da je ukupna energija udara najmanja kod uzoraka SZUT pri temperaturi ispitivanja  $-60$  °C, i iznosi oko 32 J i sva je utrošena za širenje prsline (postoji mogućnost da je na uzorku postojala inicijalna prsline), dok je najveća kod uzoraka pri temperaturi ispitivanja  $20$  °C, a iznosi oko 63 J, **od toga za stvaranje prsline potrebno je oko 30 J**, a za širenje oko 33 J. Uzorak ispitan na temperaturi  $-60$  °C najverovatnije je već imao formiranu inicijalnu prsline, pa za stvaranje prsline tokom ispitivanja nije bilo utroška energije, nego samo za njeno širenje. Primećuje se da se u rasponu temperature ispitivanja od  $20$  do  $-40$  °C, energija **za stvaranje prsline kreće oko 30 J**. Pri tome se energija širenja prsline kontinualno smanjuje od 33 do 9 J u rasponu temperature ispitivanja od  $20$  do  $-40$  °C, da bi pri temperaturi  $-60$  °C ponovo iznosila oko 33 J, što je nelogičnost koja nam kazuje da ovaj uzorak ne treba uzimati u obzir pri donošenju bilo kakvih zaključaka.

Najveća energija udara kod uzoraka OM pri temperaturi ispitivanja  $20$  °C iznosi oko 97 J, s tim što je **za stvaranje prsline potrebno oko 40 J**, a za širenje oko 57 J, dok je najmanja kod uzoraka pri temperaturi ispitivanja  $-100$  °C, a iznosi oko 58 J, od toga **za stvaranje prsline potrebno je oko 43 J**, a za širenje oko 15 J.

Primećuje se da se u rasponu temperature ispitivanja od 20 do -100 °C, energija za stvaranje prsline kreće oko 40 J, dok se energija širenja prsline kontinualno smanjuje od 57 do 15 J.

Na osnovu rezultata ispitivanja udarom OM, na temperaturama 20, -20, -60 i -100 °C, i SZUT, na temperaturama 20, -20, -40 i -60 °C, uspostavljena je polinomska zavisnosti energije udara i temperature ispitivanja, sa korelacijom oko 0.98, što je omogućilo određivanje temperature nulte plastičnosti na osnovu kriterijuma 27 J. Ta temperatura je izračunata iz uspostavljenog polinoma, sl.P12.4, Priloga 12, i iznosi za OM -139 °C, a za SZUT -77 °C.

Koristeći istu tehniku određene su temperature nulte plastičnosti za OM i konstituente zavarenih spojeva (MŠ i ZUT) za šarže 4 do7, sl.P12.2 i P12.3, Priloga 12,, koje su u literaturi [13] određene metodom padajućeg tega.

U tabeli P12.1, Priloga 12, date su uporedne vrednosti TNP za OM, ZS, MŠ, ZUT i SZUT čelika NN-70 dobijene različitim postupcima ispitivanja, analize rezultata i kriterijuma ocene. Metodom ispitivanja padajućim tegom dobijaju se više vrednosti temperature nulte plastičnosti (OM – TNP = -103 do -115 °C, ZS – TNP = -75 °C, [13]) u odnosu na ispitivanje Šarpijevim klatnom i kriterijuma 27 J (OM – TNP = -134 do -178 °C [13], MŠ – TNP = -73 °C, [82]). Vrednosti TNP za RZUT se kreću od -106 °C do -165 °C [13, 82] što je mnogo niže od TNP za SZUT, -77 °C. Uzorci za SZUT imaju homogenu strukturu kroz koju nastala prsline formira istu vrstu loma (krtu), dok prsline u RZUT delimično raste i kroz OM koji ima bolju žilavost, stvarajući dve vrste loma (krtu i duktilnu).

## **5.2. Analiza rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom**

U ovoj disertaciji je analizirano ponašanje OM čelika oznake NN-70 pri delovanju niskocikličnog zamornog (NCZ) opterećenja na sobnoj temperaturi, u uslovima zadatih regulisanih deformacija za šest različitih amplitudnih nivoa ( $\Delta\varepsilon/2 = 0.35, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70$  i  $0.80$  %), tab.3.2, kao i ponašanje SZUT čelika oznake NN-70 pri delovanju NCZ opterećenja na sobnoj temperaturi, u uslovima zadatih regulisanih deformacija za četiri različita amplitudna nivoa ( $\Delta\varepsilon/2 = 0.40, 0.50, 0.60$  i  $0.70$ ), tab.3.3.

### 5.2.1. Analiza dimenzija epruveta posle loma usled NCZ OM i SZUT

Merenjem epruveta posle loma usled NCZ OM i SZUT, utvrđena je neznatna promena prečnika epruveta na mestu loma i produženje epruveta za OM i SZUT, Prilog 13. Utvrđeno je da su se svi lomovi dogodili u blizini prelaza sa  $\varnothing 7$  na radijus epruvete R10, sl.3.3, 3.5b i Prilog 13, što je i očekivano, zbog geometrijske koncentracije napona na ovom mestu i odsustva drugog koncentratora napona na glatkom delu epruvete.

### 5.2.2. Analiza mikrostrukture i prelomnih površina posle NCZ OM i SZUT

U SZUT dominira gornji beinit (GB), a znatno manje ga ima u OM, sl. 4.1 i 4.2. Zbog toga ZUT ima smanjenu žilavost u odnosu na OM. Vrlo je mala razlika u veličini zrna i u ukupnoj strukturi OM i SZUT (nešto veća veličina zrna). Sličnost u ponašanju pri NCZ je posledica sličnosti u strukturi, jer struktura, iako nije ista ne može se opisati kao drastično različita.

#### 5.2.2.1. Analiza prelomne površina uzorka, OM, $\Delta\varepsilon/2 = 0.45 \%$

Na uzorku OM opterećenog do  $\Delta\varepsilon/2 = 0.45 \%$ , mesto nastanka loma (MNL) se nalazi na površini epruvete, sl. 4.3a, a sama prslina je inicirana na više mesta. Prostiranje prsline od mesta nastanka loma išlo je vlaknastim lomom (VL) što spada u stabilan rast prsline, sl. 4.3a.

Na sl. 4.3b, prikazano je mehanički oštećeno (MO) mesto nastanka loma pa se ne može utvrditi tačno mesto i mehanizam nastanka loma.

Pri daljem prostiranju prsline prisutni su izraženi radijalni grebeni (RG) što ukazuje na nestabilan rast prsline, što je prikazano na sl. 4.3c. I kod vlaknastih i kod radijalnih grebena površine su mehanički oštećenje tokom ispitivanja koje se izvodi naizmeničnim zatezanjem i pritiskivanjem. Uvećan izgled mehanički oštećenih radijalnih grebena prikazan je na slici 4.3d. Mehaničko oštećenje je u vidu ravne, glatke površne (MO), a između, na mestima koja nisu mehanički oštećena, se vide ostaci jamičastog loma (JL).



Između mehanički oštećenih površina loma vidljiv je deo loma koji se odvijao prevashodno mehanizmom širenja zamorne prsline (ŠZP) sa manjim učešćem jamičastog (statičkog) loma, sl. 4.3e. Na sl. 4.3f prikazan je uvećan detalj zamornog širenja prsline sa slabo izraženim zamornim brazdama (ZB).

#### 5.2.2.2. *Analiza prelomne površina uzorka, OM, $\Delta\varepsilon/2 = 0.80\%$*

Na uzorku OM opterećenog do  $\Delta\varepsilon/2 = 0.80\%$ , mesto nastanka loma (MNL), prikazano je na sl. 4.4a. Zamorna prsline je inicirana u površinskom sloju na više mesta. Tačno mesto inicijacije kao i mehanizam nije se mogao utvrditi zbog mehaničkog oštećenja (MO) područja mesta nastanka loma, sl. 4.4b.

Pri daljem prostiranjju prsline na površini loma su prisutni normalni grebeni. Grebeni koji se prostiru normalno na pravac prsline su karakteristični za vlaknast, stabilan lom (VL), sl. 4.4c. Mikromehanizam loma je bio jamičast ali ne jako izražen, više bi se reklo mehanički oštećen, jer je zaglađen.

U oba slučaja prostiranja prsline na epruvetama za ispitivanja NCZ OM, za  $\Delta\varepsilon/2 = 0.45\%$  i  $0.80\%$ , sl. 4.3a do f i sl. 4.4 a do c, lom je iniciran u površinskom sloju na više mesta i površine su bile mehanički oštećene. Kod epruvete sa  $\Delta\varepsilon/2 = 0.45\%$ , prisutni su i izraziti radijalni grebeni, mikromehanizam je zamorni lom sa manjim udelom jamičastog loma (statički oblik loma). Kod epruvete sa  $\Delta\varepsilon/2 = 0.80\%$ , prostiranje prsline se odvijalo uz prisustvo normalnih grebena sa izraženijim prisustvom jamičastog loma u odnosu na eprvetu sa  $\Delta\varepsilon/2 = 0.45\%$ . Zbog većeg stepena deformacije, broj ciklusa do loma se smanjuje, a mehanizmi loma se približavaju statičkim oblicima loma.

#### 5.2.2.3. *Analiza prelomne površina uzorka, SZUT, $\Delta\varepsilon/2 = 0.40\%$*

Na uzorku SZUT opterećenog do  $\Delta\varepsilon/2 = 0.40\%$ , zamorna prsline je inicirana na više mesta u površinskom sloju, sl. 4.5a. Za razliku od OM sa istim stepenom deformacije, kod SZUT početak zone radijalnih grebena je bliži mestu nastanka loma

(MNL). Mikromehanizam prostiranja zamorne prsline je mešoviti, zamorne brazde (ZB) su slabo izražene, a prisutan je, ali ne izrazito, jamičasti lom (JL), sl. 4.5b.

Na sl. sl. 4.5c, prikazano je područje završetka loma, završna faza loma, statički lom (SL). Mikromehanizam loma u području završetka loma je jamičasti (JL), sl. 4.5d.

#### 5.2.2.4. Analiza prelomne površina uzorka, SZUT, $\Delta\varepsilon/2 = 0.70\%$

Na uzorku SZUT opterećenog do  $\Delta\varepsilon/2 = 0.70\%$ , područje mesta nastanka loma (MNL) prikazano je na slici 4.6a. Lom je iniciran na više mesta u površinskom sloju epruvete. Površina loma je mehanički oštećena (MO) zbog naizmeničnog zatezanja i pritiskivanja epruvete, sl. 4.6b. Prisustvo radijalnih grebena (RG) ukazuje na nestabilan rast prsline. U mehanički neoštećenim područjima, najčešće u podnožju grebena, uočeno je prisustvo jamičastog loma (JL), sl. 4.6c koji predstavlja statički oblik loma (SL).

#### 5.2.3. Analiza rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom OM i SZUT

Iz rezultata ispitivanja NCZ, analizirani su moduli elastičnosti određeni za cikluse  $N_{1/4}$  (1. dinamički moduli  $N_{1/4}$ ), dok moduli za stabilizujuće cikluse (2. dinamički moduli ciklusa) nisu razmatrani, zato što vrednost modula 1. ili 2. ne utiče na krajnje rezultate ponašanja čelika NN-70 pri NCZ [82]. Na osnovu dobijenih krivih na sl.P14.1, Priloga 14, i tab.4.4, određen je **dinamički moduli  $N_{1/4}$  modul elastičnosti OM čelika NN-70** i iznosi **221.4 GPa**, a na osnovu dobijenih krivih na sl.P15.1, Priloga 15, i tab.4.5 određen je **dinamički moduli  $N_{1/4}$  modul elastičnosti SZUT čelika NN-70** i iznosi **225.0 GPa**.

Posle analize dijagrama ekstremnih sila opterećenja, F-N krive, prikazanih na sl.P16.1, Priloga 16 (za OM) i sl. P16.2, Priloga 16 (za SZUT), na pozitivnom delu F-N krivih, određen je pravolinijski deo krive koji predstavlja područje stabilizacije (područje stabilizovanih histereza), a nakon toga određeno je i područje inicijacije do praga NDT što je predstavljeno na dijagramima u tabeli P17.1 do P17.10, Priloga 17 (za OM) i tabeli P17.11 do P17.20, Priloga 17 (za SZUT).

Određivanje područja stabilizacije i područje inicijacije do praga NDT nam olakšava izbor karakterističnih histereza za analizu zavisno od primenjene metode za određivanje stabilizovane histereze, tačka 2.3.2.3, poglavlja 2.

Na slikama u tabelama P18.1 do P18.10, Priloga 18 (za OM) i u tabelama P18.11 do P18.20, Priloga 18 (za SZUT), zavisno od primenjene metode za određivanje stabilizovane histereze, iscrtani su dijagrami karakterističnih stabilizovanih histerezisnih krivih, pa zatim očitani potrebni podaci prema tački 2.3.5. Poglavlja 2, koji su upisani u tabele P.18.1 do P18.10 (za OM) i u tabele P18.11 do P18.20 (za SZUT), Priloga 18.

Za svaku karakterističnu odabranu stabilizovanu histerezu i amplitudne nivo deformacije grupisani su podaci u tabelama P19.1A do P.19.8A (za OM) i P19.9A do P19.16A (za SZUT), Priloga 19. U tabelama P19.1B do P19.8B (za OM) i P19.9B do P19.16B (za SZUT), Priloga 19, prikazani su rezultati izvršenog pripremnog proračuna za konstruisanje Ciklične naponsko deformacione krive i Osnovne krive niskocikličnog zamora, koji su vezani za određeni metod određivanja stabilizovane histereze.

Na osnovu podataka iz tabela P19.1B do P19.8B (za OM) i P19.9B do P19.16B (za SZUT), Priloga 19, određene su linearizovane stepene funkcije, a iz njih eksponenti i koeficijenti potrebni za konstruisanje CNDK, 4.7 do 4.14 (za OM) i sl. 4.15 do 4.22 (za SZUT). **Na tim slikama prikazano je i poređenje Cikličnih i Monotonih naponsko deformacionih krivih, na kojima se vidi da OM čelika NN-70 u uslovima niskocikličnog zamora slabi, dok SZUT ima mešovito ponašanje, tj. do vrednosti  $\Delta\varepsilon/2$  između 0.01 i 0.015 ojačava, a posle toga slabi.** Takođe, na sl. 4.7 do 4.14 (za OM) i sl. 4.15 do 4.22 (za SZUT) prikazane su i linearizovane elastične komponente i linearizovane plastične komponente određene na osnovu podataka iz tabela P19.1B do P19.8B (za OM) i P19.9B do P19.16B (za SZUT), Priloga 19, a radi određivanja eksponenata i koeficijenata, potrebnih za konstruisanje OKNCZ. Odnos  $\sigma_{\max}$  i  $\Delta\sigma/2$  za sve nivoe deformacija, kao i OKNCZ definisani preko odgovarajuće stabilizovane histereze prikazani su, takođe, na sl. 4.7 do 4.14 (za OM) i sl. 4.15 do 4.22 (za SZUT), **sa kojih se vidi da se kod OM linearne zavisnosti  $\sigma_{\max}-N_f$  i  $\Delta\sigma/2-N_f$  u određenom ciklusu  $N_f$  seku, dok se kod SZUT mimoilaze, s tim što je  $\Delta\sigma/2-N_f$  zavisnost ispod zavisnosti  $\sigma_{\max}-N_f$ .**

U tabeli 4.6 (za OM) i 4.9 (za SZUT) prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti jednačine CNDK za sve odabrane stabilizovane histereze čelika NN-70.

Može se primetiti da se za OM čelika NN-70 eksponent  $n'$  kreće u intervalu 0.031 do 0.048, a koeficijent  $K'$  u intervalu 887.2 do 970.5 MPa, dok se za SZUT čelika NN-70 eksponent  $n'$  kreće u intervalu 0.012 do 0.044, a koeficijent  $K'$  u intervalu 794.3 do 948.4 MPa.

U tabeli 4.7 (za OM) i 4.10 (za SZUT) prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti elastične komponente jednačine OKNCZ za sve odabrane stabilizovane histereze čelika NN-70. Primećuje se da se za OM čelika NN-70 eksponent  $b$  kreće u intervalu -0.057 do 0.085, a koeficijent  $\sigma'_f$  u intervalu 1130.1 do 1300.6 MPa, dok se za SZUT čelika NN-70 eksponent  $b$  kreće u intervalu -0.018 do -0.032, a koeficijent  $\sigma'_f$  u intervalu 914.5 do 995.8 MPa.

U tabeli 4.8 (za OM) i 4.11 (za SZUT) prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti plastične komponente jednačine OKNCZ za sve odabrane stabilizovane histereze čelika NN-70. Uočava se da se za OM čelika NN-70 eksponent  $c$  kreće u intervalu -0.564 do -0.872, a koeficijent  $\varepsilon'_f$  u intervalu 0.0612 do 0.2218, dok se za SZUT čelika NN-70 eksponent  $c$  kreće u intervalu -0.285 do -0.489, a koeficijent  $\varepsilon'_f$  u intervalu 0.0064 do 0.0272.

U tabelama 4.12 (za OM) i 4.13 (za SZUT) izračunat je prelazni vek za čelik NN-70, na osnovu parametara određenih prema raznim metodama za određivanje stabilizovane histereze. Prelazni vek,  $N_{FT}$ , za OM čelika NN-70 kreće se u intervalu 73 do 292, a za SZUT čelika NN-70 od 5 do 67, što je dosta niže u odnosu na prelazni vek od 488 ciklusa [82], za realni zavareni spoj.

### 5.3. Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije

#### 5.3.1. Otpornost na dejstvo kavitacije uzorka OM

U početku izlaganja uzorka OM dejstvu kavitacije ne uočavaju se nikakve kavitacione promene posle 30 i 60 min. Na slikama 4.24 i 4.25 primećuju se samo brazde od poliranja nastale prilikom pripreme uzorka.

Posle izlaganja uzorka dejstvu kavitacije u trajanju od 90 min primećeni su nabori na površini koji ukazuju da je došlo do deformacionog ojačavanja površine. Takođe se uočavaju i jamice lokalnog karaktera, slika 4.26. Uočene jamice mogu da nastanu ili kao posledica odvajanja uključaka od matriksa ili kao rezultat prisutne poroznosti u čeliku.

Posle 120 min uočava se veći stepen deformacionog ojačavanja jer se primećuju veći nabori površinskog sloja materijala, slika 4.27. Takođe se uočava porast veličine jamica koje se na pojedinim mestima međusobno spajaju. Ove jamice u površinskom sloju uslovljavaju fokusiranje energije udarnih talasa nastalih implozijom kavitacionih mehura čime se intenzivira efekat dejstva kavitacije.

Posle 180 min izlaganja dejstvu kavitacije, u površinskom sloju uzorka OM uočavaju se dve zone sa različitom morfologijom oštećenja koje su obeležene kao zona A i B, slika 4.28. Promene nastale u zoni A ne razlikuju se morfološki od promena nastalih u prethodnim intervalima ispitivanja. Može se zaključiti da u zoni A ni posle dodatnih 60 min izlaganja kavitacionom dejstvu nije došlo do promene u morfologiji površine, slika 4.29a. U zoni B uočavaju se grupisane jamice koje su posledica poroznosti u materijalu. Stepen oštećenja u ovom intervalu je izraženiji nego u prethodnim, na površini se primećuje pojava prslina koje su verovatno nastale porastom veličine jamice i njihovim povezivanjem, slika 4.29b.

Posle 240 min izlaganja površine uzorka OM dejstvu kavitacije uočene su brojne jamice koje su najverovatnije posledica poroznosti polaznog OM. Povećan je i broj jamica i njihova veličina, slika 4.30.

Kavitaciona brzina uzorka OM iznosi 0,0184 mg/min.

### 5.3.2. Otpornost na dejstvo kavitacije uzorka SZUT

Posle 30 min izlaganja uzorka SZUT dejstvu kavitacije ne uočavaju se nikakve kavitacione promene na površini materijala, slika 4.31.

Na slici 4.32a, posle 60 min izlaganja uzorka SZUT dejstvu kavitacije, primećuju se samo brazde od poliranja nastale prilikom pripreme uzorka, dok se na slici 4.32b uočavaju jamice čiji oblik ukazuje da su najverovatnije nastale kao posledica poroznosti materijala.

Posle 90 min izlaganja uzorka SZUT dejstvu kavitacije uočava se početna pojava ulegnuća oko kojih se deformiše materijal, slika 4.33a. Ovakva morfologija karakteristična je za otpušteni martenzit. Na slici 4.33b uočava se oštećenje koje je nastalo kao posledica poroznosti materijala.

Ovakva dva tipa morfologije se ponavljaju do kraja ispitivanja, a samo se povećava stepen oštećenja sa dužinom izlaganja dejstvu kavitacije, slike 4.34 do 4.36. Povećavaju se i broj i dubina jamica od kojih nastaju krateri oko kojih je izražena deformacija materijala. Posle 240 min ispitivanja, na slici 4.36a i b se uočavaju znatno plastično deformisani krateri.

Kavitaciona brzina uzorka SZUT iznosi 0,0205 mg/min.

## Poglavlje 6

### 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata u ovoj disertaciji vezanih za eksperimentalna razmatranja ponašanja niskocikličnog čelika povišene čvrstoće, u ovom slučaju OM i SZUT čelika NN-70, u uslovima niskocikličnog zamora i uticaja kavitacionog razaranja bazirajući se na analizi i diskusiji rezultata eksperimentalnih ispitivanja mogu se izvesti sledeći opšti zaključci:

1. U radu je opisano ispitivanje ponašanja čelika NIONIKRAL 70 i njegove simulirane grubozrne zone pod uticajem toplote, na ponašanje pri delovanju promenljivog niskocikličnog jednoosnog zatezanja na sobnoj temperaturi. Na osnovu izloženog zaključeno je da:
  - ✓ Za stvaranje prsline kod ispitivanja udarom uzoraka OM čelika NN-70, pri temperaturi ispitivanja u intervalu od 20 do -100 °C, potrebno je oko 40 J i ova vrednost je gotovo konstantna u ovom temperaturnom rasponu;
  - ✓ Za stvaranje prsline kod ispitivanja udarom uzoraka SZUT čelika NN-70, pri temperaturi ispitivanja u intervalu od 20 do -60 °C, potrebno je oko 30 J i ova vrednost je gotovo konstantna u ovom temperaturnom rasponu;
  - ✓ Osnovni materijal i simulirana zona pod uticajem toplote tokom delovanja niskocikličnog promenljivog opterećenja, posle kratkog perioda inicijalnog cikličnog ojačavanja (2 do 14 ciklusa), ciklično omekšavaju do loma;
  - ✓ Pri većim vrednostima poluraspona amplitude deformacije (0,8 % za OM i 0,7 % za SZUT) oba ispitivana materijala pokazuju sličan odgovor na niskociklični zamor;
  - ✓ Pri manjim vrednostima poluraspona amplitude deformacije (0,35 % za OM i 0,40 % za SZUT), kod epruveta izrađenih iz osnovnog metala je veći broj ciklusa do loma u odnosu na epruvete iz simuliranog ZUT. Ostali parametri (amplituda napona i udeo elastične i plastične komponente u stabilizovanim ciklusima) pokazuju slično ponašanje;

- ✓ Prelazni vek epruveta iz osnovnog metala ( $N_{FT} = 274$ ) pokazuje veću rezervu plastične deformacije u odnosu na prelazni vek epruveta iz simuliranog ZUT ( $N_{FT} = 67$ ), pri skoro istoj elastičnoj deformaciji (0.45%);
  - ✓ Metalografska analiza prelomnih površina pokazuje da se pri većim vrednostima amplituda deformacije broj ciklusa do loma smanjuje, a mehanizam loma približava statičkom lomu;
  - ✓ Kod svih epruveta oba materijala, prslina je inicirana na površini uzoraka, tj. na mestima gde su bile prisutne greške (i metalurške i tehnološke) tako da je otpornost na zamor svih uzoraka manja na površini nego u sredini poprečnog preseka.
2. Na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem otpornosti na dejstvo kavitacije, nisko legiranog čelika povišene čvrstoće, NN70, koristeći ultrazvučnu vibracionu metodu sa stacionarnim uzorcima u laboratorijskim uslovima i analizom morfologije oštećenja primenom skeniranja elektronskom mikroskopijom (SEM), mogu se izvesti sledeći zaključci:
- ✓ Morfologiju površine OM karakteriše izrazito otvrdnjavanje materijala, ali morfologija oštećenja u narednim fazama ukazuje na poroznost OM i ne može se povezati sa mikrostrukturom OM u kojoj je zastupljen martenzit i beinit;
  - ✓ Tokom ispitivanja uzoraka SZUT, mogu se primetiti dve vrste morfologije: morfologija karakteristična za martenzit i morfologija oštećenja nastala kao rezultat poroznosti materijala;
  - ✓ U slučaju SZUT pretpostavlja se da prisustvo beinita dovodi do smanjenja negativnog efekta ferita koji ima malu otpornost na efekte kavitacije.



## Literatura

- [1] Shinichi N.: *Failure Analysis in Engineering Applications*, Butterworth, Heinemann, 1990.
- [2] Fuchs, H.O., Stephens, R.I.: *Metal Fatigue in Engineering*, A Wiley - Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [3] Tot L.: *Zamorni lomovi konstrukcija – Prošlost, sadašnjost i budućnost*, Monografija sa Sedme međunarodne letnje škole mehanike loma "Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u oceni integriteta konstrukcija", TMF, Beograd, 2000., 93-118.
- [4] Mann J.Y.: *Bibliography on the Fatigue of Materials*, Components and Structures, Pergamon Press, Oxford, 1970, 1838-1950.
- [5] Smith R. A.: *The Versailles Railway Accident of 1842 and the First Research into Metal Fatigue*. Proc. of 4th. International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds. 15-20 July, Honolulu: Ed. by H. Kitagawa, T. Tanaka. Materials and Component Engineering Publications Ltd. Birmingham. Vol. IV, 1990, 2033-2041.
- [6] Schutz W.: *To the history of fatigue resistance (in German)*, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 24, 1970, 203-232.
- [7] Messadi G.: *Great Inventions through History*, Chambers, 1991, 237 p.
- [8] Barsom J. M.: *Fracture Mechanics Retrospective: Early Classic Papers, 1913-1965*, Edited by Barsom J. M., ASTM, 1987.
- [9] Fatigue Handbook, Offshore Steel Structures, Tapir, Trondheim, 1985.
- [10] <http://www.kobson.nb.rs.proxy.kobson.nb.rs:2048/pretrazivanje.84.html?words=&issn=&cat=114> (29.10.2014.)
- [11] <http://www.sciencedirect.com.proxy.kobson.nb.rs:2048/science/journal/01421123> (29.10.2014.)
- [12] Janković D. M., *Malociklusni zamor*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2001.
- [13] Grabulov V.: *Prilog definisanju uticaja hemijskog sastava i debljine lima na pojavu prskotina u zavarenim spojevima čelika Nionikral - 70*, magistarski rad, Tehnološko – metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1986.
- [14] Van Hofe, D., Middeldorf, K.: *Innovations in Joining Technology - Processes and Products for the Future*. The Paton Welding Journal, 558-559 (2000) No. 9-10, 149-156.
- [15] *Houghton-Durterrit*, Prospektni Materijal (2001)
- [16] Mueschenborn W., Imlau K.P., Meyer L., Schriever U.: *Recent Developments in Physical Metallurgy and Processing Technology of Microalloyed Flat Rolled Steels*. in: Microalloying 95. Ed. Korchynsky. ISS, Warrendale, (1995) 35-48.

- [17] Tanaka, T.: *Science and Technology of Hot Rolling Process of Steel*, Proceedings of the International Conference on "Microalloying 95", Pittsburgh, 11-14 June 1995, 165-181.
- [18] Siciliano. F., Jonas. J.J.: *Metallurgical and Materials Transactions* 31A, (2000), 511-530.
- [19] Radović N., Drobnjak Đ.: *Razvoj čelika za izradu zavarenih konstrukcija povišene sigurnosti*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol.46, br.3, 2001, str. 81-92.
- [20] Hansen K. W.: *Phase Transformation Study of X70 Steel by EBSD during In Situ Heating and Quenching*, Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, Trondheim, Norway, 2012.
- [21] Thelning K.E., Black C.M.: *Steel and its heat treatment*. Butterworths, 1984.
- [22] Gladštejn L.I., Litvinenko D.A. *Visokopročnaja stroitel'naja stali*, Metalurgija, Moskva, 1972.
- [23] Radović A., Marković D., *Nisko i srednjelegirani čelici visoke čvrstoće*, VTI, Beograd, 1976.
- [24] Duckworth W.E. *Metallurgy of structural steels: Present and future possibilities*, 1976.
- [25] Kasatkin B.S., Musijačenko V.F. *Nizkolegировannije stali visokoj pročnosti dja svarnyh konstrukcij*, Tehnika, Kiev, 1970.
- [26] Braun M.P. *Vlijanie legirajuščih elementov na svojstva stali*, Kiev, Gosizdat, 1962.
- [27] Braun M.P. *Vlijanie legirajuščih elementov na svojstva stali*, Tehničeskoj literatury USSR, Kiev, 1982.
- [28] Liebowitz H.: *Fracture*. Tom I-VII. New York, Academic Press, 1968-1971.
- [29] Tetelman A.S., Evily Mac A.J.: *Fracture of Structural Materials*, London, J. Wiley, 1967.
- [30] Fridman J.B.: *Mehaničeskie svojstva metallov*. Tom I, *Deformacija i razrušenje*, Moskva, Mašinstroenie, 1974.
- [31] Radović A. *Metalurško projektovanje zavarljivog niskolegiranog čelika visoke čvrstoće otpornog prema prostiranju prskotine*, Doktorska disertacija - Beograd, 1977
- [32] Radović A. *Predlog metode za određivanje zavarljivosti niskolegiranih čelika visoke čvrstoće*, VTI, Beograd, 1966.
- [33] Grabin V.F., Denisenko A.V. *Metalovedenie svarki nizko i srednelegirovannih stalej*, Naukova dumka, Kiev, 1978.
- [34] Hrivnjak I. *Zavarljivost čelika*, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1982.
- [35] Sedmak A., Šijački-Žeravčić V., Milosavljević A., Đorđević V., Vukićević M.: *Prsline u zavarenim spojevima, Mašinski materijali-drugi deo*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2000., str. 31-37.
- [36] Pod redakcijom Patona B.E. *Tehnologija električeskoj svarki metallov i splavov plavljeniem*, Mašinstroenie, Moskva, 1974.

- [37] Radović A. Metalurški i tehnološki problemi zavarljivosti, zbornik referata – Međunarodno savetovanje "Vranje 85", Beograd, 1985.
- [38] Granjon H. Pojava hladnih prslina pri zavarivanju (prevod) DOC IIW - IX - 748 – 71.
- [39] Easterling K. Introduction on the Physical Metallurgy of Welding, London, 1983.
- [40] Radović A. Prskotina u zavarenim spojevima čelika visoke čvrstoće, VTI-Beograd, 1977.
- [41] Farrar C.M., Dolby R.E. An investigation into lamellar tearing, Metal construction and BWJ, Volume 1, No 27, 1969.
- [42] Kihara H., Nishio Y. On the Lamellar Tearing in Multirun. Fillet Welds, IIW-IX-841-73.
- [43] Vidojević N.: *Strukturne promene uz metal šava pri zavarivanju čelika topljenjem*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol.45, br.3, 2000, str. 115-118.
- [44] M. H. Sorsorov, T. A. Cernysova, A. J. Krasovskij, Ispytanija metallov na svarivaemost, Metallurgija, Moskva, 1972.
- [45] Milović Lj. *Analiza integriteta zavarenih komponenata procesne opreme za povišene radne temperature*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2008.
- [46] Schwalbe K.H, Zerbst U, Brocks W, Cornec A, Heerens J, Amstutz H. The ETM method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures. *Fatigue&Fracture of Engineering Materials&Structures* 1998; 21: 1215-1231.
- [47] Schwalbe K.H, Kim Y.J, Hao S, Cornec A, Kocak M. EFAM ETM-MM 96-The ETM method for assessing the significance of crack-like defects in joints with mechanical heterogeneity (strength mis-match). 1997; Report GKSS 97/E/99
- [48] Zavareni spojevi.// *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija/ Aleksandar Sedmak*. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2003. Str. 113-131.
- [49] *Penstock structural integrity and evaluation.// Pressure equipment integrity assessment by elastic-plastic mechanics methods/ Aleksandar Sedmak, Stojan Sedmak, Ljubica Milović*. Beograd: Society for Structural Integrity and Life (DIVK), 2011. Str. 165-190.
- [50] Sedmak S, Sedmak A. Integrity of penstock of hydroelectric powerplant. *Structural Integrity and Life* 2005; 5: 59-70.
- [51] Sedmak S. Crack problems in welded structures. In: Sedmak S, Radaković Z, Lozanović J, editors. *The challenge of materials and weldments*, Ninth International Fracture Mechanics Summer School, Zlatni Pjasci, Bulgaria, 2008. Str. 3-33.
- [52] Hrivnjak I., *Theory of weldability of metals and alloys*, Department of Materials Science, Faculty of Metallurgy, Technical University, Kosice, Czechoslovakia, Elsevier, New York, USA, 1992.
- [53] Odanović Z.: *Numeričko modeliranje toplotnog režima procesa elektrolučnog zavarivanja čelika i predviđanje mogućih efekata na zonu uticaja toplote*, (1993), Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1993.

- [54] Akselsen O.M.: *Transformation Behaviour*, NTNU, Trondheim, Norway, 2012, p. 15.1-15.19.
- [55] Stridsklev C.A.: *Sulfide Stress Corrosion Cracking Resistance of Modified ASTM A694 F60 Low Alloy Steel for Subsea Application*, Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, Trondheim, Norway, 2013.
- [56] Fairchild, D.P.: *Fracture toughness and testing of weld heat affected zones in structural steel*, ASTM STP 1058, 1988, str. 117-141.
- [57] Thaulow C., Hauge M., Paauw A.J, Toyoda M., Minami F.: Effect of notch tip location in CTOD testing of the heat affected zone of steel weldments, Proceedings ECF 10, Structural Integrity: Experiments - Models - Applications, Edited by K-H. Schwalbe, C. Berger, 1994, str. 1053-1066.
- [58] Gerić K., Sedmak S.: *Otpornost prema prslinama zone uticaja toplote mikrolegiranih čelika*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol.45, br.2, 2000, str. 59-62.
- [59] Harrison J.D. and Anderson T.L.: *The application of fracture mechanics to welded construction*, Eighteen ASTM National Symposium on Fracture Mechanics, Boulder, Colorado, 1985, str. 1-16.
- [60] Momčilović D.: *Ispitivanje otpornosti na nastanak i rast prslina čelika 12H1MF pri dejstvu udarnog opterećenja*, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [61] Odanović Z.: *Numerička simulacija toplotnog režima procesa zavarivanja čelika*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol.47, br.1, 2002, str. 3-8.
- [62] Geric K.: *Pojava i rast prslina u zavarenim spojevima čelika povišene čvrstoće*, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1997.
- [63] Adžijev G., Sedmak A., Gliha V., Vuherer T.: *Uticaj termičkog ciklusa zavarivanja na žilavost ZUT mikrolegiranog čelika*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 3/2003, str. 144-147.
- [64] Wellinger K., Dietmann H.: *Festigkeitsberechnung*, Alfred Kroner Verlag, Stuttgart, 1968.
- [65] Jacoby, G.: *Schwingfestigkeit*, PAB-PT 5/1, Schenck Druckschrift, S.40.
- [66] Sonsino, C. M.: *Bedeutung von Aufnahmeverfahren zur Ermittlung von zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven*, in *Kurzzeit-Schwingfestigkeit und elasto-plastisches Werkstoffverhalten*, Hrsg.: K. T. Rie und E. Haibach. Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin, 1979, S. 21-229.
- [67] Grubišić, V., Sonsino C. M.: *Kurzzeitschwingfestigkeit bei Raumtemperatur, in Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung*, Verein Deutscher Eisenhiittenleute, Düsseldorf 1979, S. 308-318.
- [68] Sonsino, C. M., Grubišić, V., *Kurzzeitschwingfestigkeit von duktilen Staehlen unter mehrachsiger Beanspruchung*, Werkstofftechnik 15, Nr. 11, 1984, S.378-386.
- [69] Vnuk M.: *Uvod u mehaniku loma u linearnoj elastičnosti*, Monografija sa Prve međunarodne letnje škole mehanike loma "Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma", GOŠA-TMF, Beograd, 1980., P 2, 27-54. 1

- [70] Janković, D. M.: *Pogonska čvrstoća – Zamor – Akumulacija oštećenja – Vek trajanja*, monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 2011, str.162.
- [71] Radović A., Marković D.: *Osvajanje brodograđevnog čelika povišene čvrstoće - NIONIKRAL-70*, VTI, Beograd, 1984.
- [72] Grover H.J., Bishop S.M., Jackson L.R., *Fatigue strength of aircraft materials. Axial load fatigue tests on unnotched sheet specimens of 24S-T3, 75S-T6 aluminum alloys and of SAE 4130 steel*, NACA TN 2324, 1951.
- [73] Schijve J.: *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004.
- [74] Krčedinac D., *Dinamička izdržljivost na niskociklični zamor i procena veka rada obrtnih delova TMM*, Specijalistički rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 1993.
- [75] Wood W.A.: *Recent observations of fatigue fracture in metals*, STP237, Symposium on basic mechanisms of fatigue, ASTM, Philadelphia, 1958, str. 110
- [76] Ahmed A. M., *Primena parametara mehanike loma za ocenu ponašanja zavarenog spoja pri zamornom opterećenju*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko metalurški fakultet, Beograd, 1987.
- [77] Brock D.: *Elementary engineering fracture mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, 1983.
- [78] Pippin R., Grosinger W.: *Fatigue crack closure: from LCF to small scale yielding*, International Journal of Fatigue (2012), Accepted Manuscript, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.02.016, str. 36.
- [79] Aleksić V., Bulatović S., Milović Lj.: *NDT in function prevention of loss integrity of structures large dimensions*, 5<sup>th</sup> Jubilee Balkan Mining Congress 2013, Ohrid, Macedonia, str. 112-118.
- [80] Aleksić V., Vistić B., Milović Lj.: *Ispitivanja turbinskih vratila u funkciji donošenja odluke o sanaciji*, 2. Konferencija "ODRŽAVANJE 2012", Zenica, B&H, 2012, str. 73-80.
- [81] Forsyth, P.J.E.: "The physical basis of metal fatigue II", American Elsevier Publishing CO., New York, 1969.
- [82] Bulatović S.: *Elasto-plastično ponašanje zavarenog spoja od niskolegirano čelika povišene čvrstoće u uslovima niskocikličnog zamora*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [83] Stephens R., Ali F., Robert S., Henry F.: *Fatigue mechanisms and microscopic features, Metal Fatigue in Engineering*, New York: John Wiley&Sons Inc, 2001.
- [84] Christensen R.H. *Fatigue Cracking, Fatigue Damage and Their Detection, Metal Fatigue*. Mc Graw-Hill Book Co, New York, 1959.
- [85] Posavljak S., *Naponsko-deformaciona analiza i zamor materijala rotacionih diskova turboblaznih motora*, Magistrski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 1999.

- [86] Posavljak S., *Istraživanje zamornog veka rotacionih diskova avionskih motora*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2008.
- [87] Plavšić N., *Dinamika loma zategnutih štapova sa kružnim zarezom*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Beograd 1979.
- [88] Roberts M. L., *Engine Life, Usage, and Cycle Selection*, Journal of Aircraft 1978, Vol. 15, No 4, pp 240-245.
- [89] Bannantine J. A., Comer J., Handrock J., *Fundamentals of Material Fatigue Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1990.
- [90] Коллинз Дж., *Повреждение материалов в конструкциях – Анализ, Предсказание, Предотвращение*, Перевод с английского, “МИР”, Москва 1984.
- [91] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П., *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*, Справочник, Машиностроение, Москва 1985.
- [92] Janković D. M., *Eksperimentalno određivanje tokova zamaranja materijala pri ciklično promenljivim elasto-plastičnim deformacijama*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 1988.
- [93] Legat J.: *Prilog proučavanju razvoja prsline pri zamornom opterećenju zavarenih spojeva konstrukcijskih čelika*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko metalurški fakultet, Beograd, 1988.
- [94] ASTM E468-82: Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials, ASTM Designation E468-82, Annual Book of ASTM Standards 1985, Vol. 03.01, str. 607.
- [95] ASTM E606-80: Standard Recommended Practice for Constant Amplitude Low Cycle Fatigue Testing, ASTM Designation E606-80, Annual Book of ASTM Standards 1985, Vol. 03.01, str. 681.
- [96] ISO 12106:2003(E): *Metallic materials-fatigue testing-axial-strain-controlled method*, Geneva: ISO 2003, Switzerland.
- [97] ASTM E513-74: Definitions of Terms Relating to Constant Amplitude, Low-Cycle Fatigue Testing, ASTM Designation E513-74, Annual Book of ASTM Standard 1985, Vol. 03.01, str. 616.
- [98] Landgraf R.W., *The Resistance of Metals to Cyclic Deformation*, Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys, ASTM STP 467, American Society for Testing and Materials, 1970, pp. 3-36.
- [99] Socie D. F., Mitchell M. R., Caulfield E. M., *Fundamentals of modern fatigue analysis*, FCP Report No. 26, Department of Theoretical and Applied Mechanics, A report of the fatigue control program, College of Engineering, University of Illinois, Urbana, USA, 1978.
- [100] ASTM STP 465, Manual on Low Cycle Fatigue Testing, ASTM, Philadelphia, 1969.
- [101] Morrow J. D.: *Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals*, ASTM STP No. 378, 1965, p. 45-87.

- [102] Klee S.: *Das zyklische Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten verschiedener Stähle*, Doktorska disertacija, Veröffentlichungen des Institute Fur Statik und Stahlbau der T. H. Darmstadt, 1973, S.108 + 98 Figuren.
- [103] Schmidt W.: *Einführung und Prüfverfahren, Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung*, Verein Deutscher Eisenhiittenleute, Düsseldorf, 1979, S. 1-22.
- [104] Janković D. M.: *Gesetze des Ermüdungsprozesses-Grundlage zum Bestimmen der Lebensdauer und Betriebsfähigkeit von Maschinenteilen und Konstruktionen*, Proceedings of the International Conference on Engineering Design-ICED-90, Dubrovnik, 1990, Vol. 3, str. 1449-1456.
- [105] Janković D. M.: *Metod proračuna mašinskih delova izloženih malim lokalnim plastičnim deformacijama*, Zbornik radova, knjiga 2 - Projektovanje, TM'93" Kruševac-Vrnjačka banja, 1993, str. 336-371.
- [106] Janković D. M.: *Eksperimentalno određivanje tokova zamaranja materijala pri ciklično promenljivim elasto-plastičnim deformacijama*, Zbornik radova, knjiga 4 – materijali - ispitivanje i kontrola, TM'93, knjiga 2 - Projektovanje, Kruševac-Vrnjačka banja., 1993, str. 153-158.
- [107] Janković D. M.: *Promena otpora polikristalnih materijala u toku ciklično promenljivog elasto-plastičnog deformisanja i uslovi nastanka zamorne naprsline*, Zbornik radova sa 20. Jugoslovenskog kongresa primenjene i teorijske mehanike, sekcija C, Kragujevac, 1993, str. 152-155.
- [108] Janković D. M.: *O hipotezama energetskog kriterijuma zamora metala*, Tehnika, Mašinstvo 43, Beograd, 1994, str. M9 - M14.
- [109] Janković D. M.: *O hipotezama deformacionog kriterijuma zamora metala*, Tehnika, Mašinstvo 44, Beograd, 1995, str. M1 - M7.
- [110] Janković D. M.: *Naponsko deformaciona analiza procesa zamaranja i kriterijum za nastanak naprsline*, Naučni skup - Mehanika, materijali i konstrukcije, Srpska akademija nauka i umetnosti, knj. LXXXIII, Odeljenje tehničkih nauka, knj. 2, Beograd, 1996, str. 191-198.
- [111] Janković D. M.: *Development and Coordination of the Fatigue Crack Initiation Criteria in Metals*, Transactions, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Vol. XXV, issue 1, 1996, p. 15-19.
- [112] Janković D. M.: *Abuot Some Various Interpretations of the Fatigue Criterion at Low Number of Strain Cycles*, to be published in Facta Universitatis, Series Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 8, Niš, 2001, p. 10.
- [113] Vable M.: *Mechanics of Materials*, Second Edition, Michigan technological University, USA, 2012.
- [114] ASTM E111-04 (2010): Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus, ASTM Designation E111-04, Pennsylvania 19428-2959, United States.
- [115] [www.grfic.com/download/finish/18.../65-predavanja-opsti-deo](http://www.grfic.com/download/finish/18.../65-predavanja-opsti-deo)

- [116] SRPS EN ISO 6892-1:2012: Metalni materijali — Ispitivanje zatezanjem — Deo 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012.
- [117] Terzić P., *Ispitivanje metala, Deo I: Mehanička ispitivanja*, Institut za ispitivanje materijala SRS, Beograd, 1972.
- [118] Arsenijević M., Valčić A., Brekić M., *Fizičko mehaničko ispitivanje materijala*, Univerzitet u Beogradu, Građevinska knjiga, Beograd, 1972.
- [119] <https://sr.scribd.com/doc/129910369/Vezba-4-Modul-elasticnosti-pdf>
- [120] Kostaes D., *Fatigue Behaviour and Analysis*, Talat Lecture 2401, Technishe Universität München, EAA – European Aluminium Association, 1994.
- [121] Klysz S., *Load Sequence Influence on Low Cycle Fatigue Life*, Technical Sciences, No. 8, 2005 ([http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/ts8/14\\_18\\_2005.pdf](http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/ts8/14_18_2005.pdf))
- [122] Morrow J., *Fatigue Design Handbook*, Advances in Engineering, Vol. 4, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1968, Sec. 3.2, pp. 21-29.
- [123] Tso-Liang Teng, Pebg-Hsiang Chang, *Fatigue Crack Initiation Life Prediction for a Flat Plate with a Central Hole*, Journal of C.C.I.T. Vol. 32, No 1, Nov. 2003.
- [124] Chamis C. C., *Probabilistic Structural Analysis Methods (PSAM) for Select Space Propulsion System Components – II (6th Annual Report)*, NASA Contractor Report 187200, Southwest Research Institute, Texas, Novembar 1991.
- [125] Manson S. S., Halford G. R., *Practical Implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage Curve approach for Treating Cumulative Fatigue Damage*, International Journal of Fracture, Vol. 17, No. 2, 1981, pp. 169-172, R35-R42.
- [126] Smith K. N., Watson P., Topper T. H., *A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals*, Journal of Materials, JMLSA, Vol. 5, No. 4, Dec. 1970, pp. 767-778.
- [127] Roessle M.L, Fatemi A. Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations. International Journal of Fatigue, 22, 2000, str. 495-511.
- [128] Stephens R., Fatemi A., Stephens R., Fuchs H.: Cyclic deformation and the strain-life approach. Metal Fatigue in Engineering, New York: John Willey&Sons Inc, 2001, str. 93-121.
- [129] Brennen C.E.: *Cavitation and Bubble Dynamics*, Cambridge University Press, California Institute of Technology, United States of America, 2014.
- [130] Dojčinović M., *Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije*, Monografija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2013.
- [131] Frost D., Sturtevant B.: Effects of ambient pressure on the instability of a liquid boiling explosively at the superheat limit. *ASME J. Heat Transfer*, 108, 1986, str. 418–424.
- [132] Soyama H., Kato, H., Oba R.: Cavitation observations of severely erosive vortex cavitation arising in a centrifugal pump. *Proc. Third I.Mech.E. Int. Conf. on Cavitation*, 1992, str. 103–110.
- [133] Knapp R.T., Daily J., Hammit F.: Cavitation, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1970, str 343–347



- [134] Technical Information, Cavitation in Control Valves, Part 3 Control Valves, Samson AG, Frankfurt, Germany, 2011.
- [135] Crnojević C.: Klasična i uljna hidraulika, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
- [136] Dojčinović M.: *Uticaj strukture na mehanizam razaranja čelika pod dejstvom kavitacije*, doktorska disertacija Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2007.
- [137] Đorđević, V.: Prilog proučavanja kavitacionog dejstva na kompozitne materijale, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1978.
- [138] Okada T., Iwai Y.: Cavitation erosion, *JSME Int. J.* 33, 1990, str. 128-135.
- [139] Szkodo M.: Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials, 13<sup>th</sup> International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering, Gliwice-Wisla, Poland, 2005, str. 647-650.
- [140] Kim K.H., Chahine G., Franc J.P., Karimi A.: *Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction*, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014, str. 269-273.
- [141] Hattori S., Mikami N.: Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, *Wear* 267, 2009, str. 1954–1960.
- [142] Đorđević, V., Pregled metoda za laboratorijska ispitivanja kavitacione erozije, *Tehnika, Mašinstvo, Godina XXII*, 1973.
- [143] Stettier, K., Krzysztofowicz, Reymann, T. Z., Effects of Cavitation on Materials in Field and Laboratory Conditions, *Erosion, Wear, and Interfaces with Corrosion*, ASTM Spec. Tech. Publ. 567, 1974, pp.152-170.
- [144] HDss, V.S., Hirth, F.W., Louis, H., Bauer, G.H., *Werkst. Korros.*, 31 (1980) 1-14.
- [145] Hansson, I., Morch, K.A., *Proc. Int. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact*, Cambridge, September 1979, Cavendish Laboratory, 1979, pp.1-7.
- [146] Karimi, A., Avellan, F., Comparison of Erosion Mechanism in Different Types of Cavitation, *Wear*, 113 (1986) 305-322.
- [147] Hancox, N.L., Brunton, I.H., *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 260 (1966) 121.
- [148] Karimi, A., et al., *Proc. of Int. Conf. on the Strength of Metals and Alloys*, Montreal, August 12-16, 1985, Vol.2, Pergamon, Oxford, 1985, pp.1607-1612.
- [149] Hucinska, J., Glowacka, M., Cavitation Erosion of Copper and Copper-Based Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32A (2001) 1325-1333.
- [150] ASTM G 32 - 03, *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [151] Designation: G 134 – 95, *Standard test method for erosion of solid materials by a cavitating liquid Jet*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [152] Odanović Z., Kisa P.: *Definisanje geometrije zavarenog spoja čelika primenom analize slike*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol.45, br.4, 2000, str. 145-148.

- [153] Milović Lj., Bulatović S., Aleksić V., Burzić Z.: *Low cycle fatigue of weldments produced of a high strength low alloyed steel*, 20th European Conference on Fracture (ECF20), Procedia Materials Science 3 (2014) 1429-1434.
- [154] Milović Lj., Vuherer T., Radaković Z., Petrovski B., Janković M., Zrilić M., Daničić D.: *Oređivanje parametara zamornog rasta prsline kod zavarenih spojeva od HSLA čelika*, Integritet i vek konstrukcija, Vol.11, No3, 2011, str. 183-187.
- [155] Bulatovic S., Burzic Z., Aleksic V., Sedmak A., Milovic Lj.: Impact of Choice of Stabilized Hysteresis Loop on the End Result of Investigation of High-Strength Low-Alloy (HSLA) Steel on Low Cycle Fatigue, METALURGIJA, (2014), vol. 53 br. 4, str. 477-480.
- [156] Aleksic V., Dojčinović M., Milovic Lj., Samardžić I.: Cavitation damages morphology of high-strength low-alloy steel, METALURGIJA, (2016), vol. 55 br. 3, str. 423-425.
- [157] Aleksić V., Milović Lj., Aleksić B., Bulatović S., Burzić Z., Hemer M. A.: Niskociklični zamor uzoraka čelika Nionikral 70 (Behaviour of Nionikral-70 in low-cycle fatigue), časopis "Integritet i vek konstrukcija", Vol.17, br. 1, 2017, str. 61-73.
- [158] Aleksić V., Milović Lj., Aleksić B., Abubkr M. Hemer: Indicators of HSLA steel behavior under low cycle fatigue loading, 21st European Conference on Fracture, ECF21, 20-24 June 2016, Catania, Italy, Procedia Structural Integrity 2 (2016) 3313–3321.
- [159] Aleksić V., Aleksić B., Milović Lj.: Metodologija određivanja pokazatelja ponašanja HSLA čelika pri delovanju niskocikličnog zamora, V Međunarodni kongres „Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji”, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 15.03.-17.03. 2017, CD, str. 1123-1135.
- [160] Aleksić B., Aleksić V., Hemer M. A.(bubkr), Milović Lj., Grbović A.: Determination of the region of stabilization on low-cycle fatigue HSLA steel from test data, Proceedings of the 17th International Conference on New, Trends in Fatigue and Fracture (NT2F17), October 25-27th, 2017, Cancun, Mexico, str. 101-112.
- [161] Aleksić V., Aleksić B., Milović Lj.: Methodology for determining the region of stabiliation of low-cycle fatigue, Book of Abstracts, 16th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture (NT2F16), May 24-27, 2016, Dubrovnik, Croatia, str. 189 – 190.
- [162] Aleksić V., Milović Lj., Blačić I., Vuherer T., B. Srđan: Effect of LCF on behaviour and microstructure of microalloyed HSLA steel and its simulated CGHAZ, Engineering Failure Analysis, Vol. 104, October 2019, str. 1094-1106.
- [163] SRPS EN 13018:2008, *Ispitivanja bez razaranja - Vizuelno ispitivanje - Opšti principi*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [164] SRPS EN ISO 9934-1:2008, *Ispitivanja bez razaranja - Ispitivanje magnetskim česticama - Deo I: Opšti principi*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [165] SRPS EN 583-1:2007, *Ispitivanja bez razaranja - Ispitivanje ultrazvukom - Deo I: Opšti principi*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [166] SRPS EN 14127:2008, *Ispitivanja bez razaranja - Merenje debljine ultrazvukom*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.

- [167] SRPS EN 10160:2010, *Ultrazvučno ispitivanje pljosnatih proizvoda od čelika debljine 6 mm ili veće (metoda refleksije)*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [168] SRPS C.A4.030:1986, *Mehanička ispitivanja metala - ispitivanje tvrdoće po Vickersu (od HV 5 do HV 100)*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [169] Tickoo S., Saravanan D. (2008). *SolidWorks 2008 za mašinske inženjere*. Mikro knjiga (prevod Jasmina Đorđević). Beograd.
- [170] EN 10002-1:2001, *Metallic materials – Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature*, European committee for standardization, Brussels, EU.
- [171] SRPS EN ISO 10045-1:1993, *Mehanička ispitivanja metala - ispitivanje udarom po Šarpiju - Deo 1: Metoda ispitivanja*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [172] SRPS EN ISO 148-1:2012, *Metalni materijali - Ispitivanje udarom Šarpijevim klatnom - Deo 1: Metoda ispitivanja*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [173] ASTM E23-07a, *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [174] ASTM E 208-06, *Standard Method of Conducting Drop-Weight test of determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [175] BS 7608:1993, *Code of practice for Fatigue design and assessment of steel structures*, BSI - British Standards Institution, London, United Kingdom.
- [176] SRPS EN 60609-1:2009, *Hidraulične turbine, akumulacione pumpe i pumpne turbine - Procena stvaranja korozije usled kavitacije - Deo 1: Procena u reakcionim turbinama, akumulacionim pumpama i pumpnim turbinama*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [177] SRPS EN 60609-2:2009, *Procena pojave korozije na hidrauličnim turbinama, akumulacionim pumpama i pumpnim turbinama usled kavitacije - Deo 2: Procena na Peltonovim turbinama*, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- [178] Dojčinović M., Volkov-Husović T., *Cavitation damage of the medium carbon steel: Implementation of image analysis*, Materials Letters (MATER LETT) 62 (2008) 953-956.
- [179] Dojčinović M., Marković S., *The morphology of cavitation damage of heat-treated medium carbon steel*, Journal of the Serbian Chemical Society (J SERB CHEM SOC.) 71 (8-9) (2006) 977-984.
- [180] Dojčinović M., *Comparative cavitation erosion test on steels produced by ESR and AOD refining*, Materials Science, Poland (MATER SCI-POLAHD), 29 (3) (2011) 216-222.
- [181] Dojčinović M., *Roughness measurement as an alternative method in evaluation of cavitation resistance of steels*, HEM.IHD., 67 (2) (2013) 323-330.

[182] Aleksić B., Aleksić V., Milović Lj., Hemer M. A., Prodanović A.: Determination of Polynomial Depending Between Hardness and Cooling Time  $\Delta t_{8/5}$  of Steel Nionical 70 Heat affected Zone, Proceedings of the 18th International Conference on New, Trends in Fatigue and Fracture (NT2F18), July 17-20, 2018, Lisbon, Portugal, str. 87-90.

[183] Dieter G.E., *Mechanical metallurgy*, SI metric edition, McGraw-Hill, 1988.

[184][http://www.sut.ac.th/engineering/Metal/pdf/MechMet/14\\_Brittle%20fracture%20and%20impact%20testing.pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/Metal/pdf/MechMet/14_Brittle%20fracture%20and%20impact%20testing.pdf)

## Biografski podaci autora

Vujadin Aleksić je rođen 08.03.1963. godine u Donjoj Brijesnici, Opština Lukavac, bivša Bosna i Hercegovina. U Lukavcu je završio osnovnu školu. U Vazduhoplovnoj gimnaziji „Maršal Tito” iz Mostara završio je prva dva razreda, a potom treću i četvrtu godinu završava u gimnaziji u Lukavcu. Od 1984. do 1989. god. studirao je na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Tuzli, mašinski smer. Diplomirao je u martu 1989. god. kada je odbranio diplomski rad "Kinematička i dinamička analiza radnog mehanizma hidrauličnog bagera RH40 u uslovima kopanja uglja na PK “Šikulje” u Lukavcu". Magistarske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na katedri za Mašinske materijale i zavarivanje upisao je 1992. godine. Magistarski rad "Primena inženjerskih metoda za određivanje sile rasta prsline u zavarenim spojevima sa zaostalim naponima i geometrijskim nepravilnostima" odbranio je 1999. godine.

Stručni ispit iz mašinstva u rudarstvu (br.3565/R) položio je 1999. godine. Na kursu 2003. god., stekao je diplomu za međunarodnog inženjera za zavarivanje, IWE, No: RO/IWE/00123. Od 2006. do 2010. završio je sledeće kurseve za ispitivanje metodama bez razaranja: vrtložne struje-nivo I, ispitivanje magnetnim česticama-nivo I, ispitivanje radiografijom-nivo I, ispitivanje penetranskim tečnostima-nivo II i ispitivanje ultrazvukom-nivo I.

Od juna 1989. do 1994. radi u Fabrici šinskih vozila, HK GOŠA iz Smederevske Palanke. Radni staž je počeo u proizvodnji kao inženjer u pogonskoj pripremi, kasnije nastavio kao konstruktor u Birou za konstrukciju alata, a potom kao glavni tehnolog za zavarivanje u Birou za tehnološku pripremu. Od 1994. do 2004. radi u Birou za projektovanje Instituta GOŠA u Beogradu kao projektant. Od 2004. god. do februara 2008. radi u Institutu za ispitivanje materijala IMS, kao glavni inženjer, a zatim kao rukovodilac Laboratorije za ispitivanje metala. Od februara do juna 2008. godine radi u Centru za procesno inženjerstvo-CPI, Kiriši, Rusija, kao glavni inženjer za ulaznu kontrolu na gradilištu kompleksa za duboku preradu nafte. Od juna 2008. ponovo je u Institutu IMS kao samostalni, a sada vodeći diplomirani inženjer u Laboratoriji za ispitivanje metala.

U zvanje istraživač saradnik izabran je 2001., a 2005. reizabran na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Godine 2010. Na Naučnom veću Instituta IMS izabran je u zvanje viši stručni saradnik, a 2016 u zvanje stručni savetnik.

U dosadašnjem stručnom i istraživačkom radu učestvovao je u više naučno-istraživačkih projekata financiranih od strane Ministarstva za nauku. Član je Društva za integritet i vek konstrukcija od njegovog osnivanja. Autor je i koautor više od 80 stručnih i naučnih radova, koji su saopšteni na naučnim skupovima ili objavljeni u časopisima različitih kategorija, a od toga dva rada štampano je u međunarodnim časopisima koji imaju impakt faktor na SCI listi, gde je prvi autor.

Od 2011. godine je sa 12 istraživač-meseci angažovan na projektu tehnološkog razvoja financiranom od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja »Integritet opreme pod pritiskom pri istovremenom delovanju zamarajućeg opterećenja i temperature«, ev. br. TR 35011. Kao jedan od rezultata projekta predviđena je i ova doktorska disertacija.

U svakodnevnom radu služi se kompjuterskim programima: MS Office, SolidWorks, a služi se i drugim komercijalnim programima za modeliranje, konstruisanje, projektovanje i proračun konstrukcija. Koristi literaturu na ruskom, engleskom i nemačkom jeziku.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а \_\_\_\_\_ Алексић Д. Вујадин \_\_\_\_\_

број уписа \_\_\_\_\_ 21/10 од 21.02.2014. \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

#### Нискоциклични замор нисколегираних челика повишене чврстоће

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, \_\_\_\_\_ 15.05.2019. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_ Алексић Д. Вујадин \_\_\_\_\_

Број уписа \_\_\_\_\_ 21/10 од 21.02.2014. \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_ Докторске академске студије \_\_\_\_\_

Наслов рада \_\_\_\_\_ Нискоциклични замор нисколегираних челика повишене чврстоће \_\_\_\_\_

Ментор \_\_\_\_\_ др Љубица Миловић, редовни професор \_\_\_\_\_

Потписани \_\_\_\_\_ Алексић Д. Вујадин \_\_\_\_\_

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_ 15.05.2019. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## Прилог 3.

**Изјава о коришћењу**

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

**Нискоциклични замор нисколегираних челика повишене чврстоће**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

**3. Ауторство – некомерцијално – без прераде**

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 15.05.2019.

\_\_\_\_\_

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.