

UNIVERSITY
OF EAST
SARAJEVO



FACULTY OF
TECHNOLOGY
ZVORNIK



INTERNATIONAL CONGRESS MEĐUNARODNI KONGRES

ENGINEERING, ENVIRONMENT
AND MATERIALS IN
PROCESSING INDUSTRY

INŽENJERSTVO, EKOLOGIJA
I MATERIJALI U
PROCESNOJ INDUSTRIJI

PROCEEDINGS

KNJIGA RADOVA



JAHORINA
15.03.-17.03.2017.

REPUBLIKA SRPSKA
BOSNA I HERCEGOVINA



TEHNOLOŠKI
FAKULTET ZVORNIK
UZ PODRŠKU:

SAVEZ INŽENJERA
I TEHNIČARA SRBIJE
Beograd, Srbija

TEHNOLOŠKO-TEHNIČKI
FAKULTET ŠTIP
Makedonija

TEHNOLOŠKO-METALURŠKI
FAKULTET SKOPJE
Makedonija

**UNIVERZITET U ISTOČNOM SARAJEVU
TEHNOLOŠKI FAKULTET ZVORNIK**



**UNIVERSITY OF EAST SARAJEVO
FACULTY OF TECHNOLOGY ZVORNIK**

**ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS**

V INTERNATIONAL CONGRESS

**„ENGINEERING, ENVIRONMENT AND MATERIALS IN
PROCESSING INDUSTRY“**

V MEĐUNARODNI KONGRES

**„INŽENJERSTVO, EKOLOGIJA I MATERIJALI U PROCESNOJ
INDUSTRIJI“**

**UNDER AUSPICES OF
THE MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF REPUBLIC OF SRPSKA
THE ACADEMY OF SCIENCE AND ART OF REPUBLIC OF SRPSKA**

**POD POKROVITELJSTVOM
MINISTARSTVA NAUKE I TEHNOLOGIJE REPUBLIKE SRPSKE
AKADEMIJE NAUKA I UMJETNOSTI REPUBLIKE SRPSKE**

**JAHORINA, 15.03.-17.03. 2017. GODINE
REPUBLIKA SRPSKA
BOSNA I HERCEGOVINA**

**IZDAVAČ/PUBLISHER:
TEHNOLOŠKI FAKULTET**

Karakaj 34a, 75 400 Zvornik
Republika Srpska, BiH
Telefon: +387 56 26 10 72
Fax: +387 56 26 01 90
e-mail: sekretar@tfzv.org
web: www.kongres.tfzv.org

ZA IZDAVAČA/FOR PUBLISHER:

Prof. dr Miladin Gligorić, dean/dekan

ORGANIZACIONI ODBOR/ORGANIZING COMMITTEE:

Prof. dr Miladin Gligorić, predsjednik, Doc. dr Aleksandar Došić, sekretar, Prof. dr. Milovan Jotanović, Prof. dr Miomir Pavlović, Prof. dr. Radoslav Grujić, Prof. dr Dragica Lazić, Prof. dr Goran Tadić, Prof. dr Milorad Tomić, Prof. dr Mitar Perušić, Prof. dr Ljubica Vasiljević, Prof. dr Vaso Novaković, Doc. dr Dragan Vujadinović, Dipl. inž. Novo Škrebić, Mr Mirjana Beribaka, Mr Danijela Rajić, Mr Marija Ridošić, Mr Stefan Pavlović

**NAUČNI I PROGRAMSKI ODBOR / SCIENTIFIC AND PROGRAMME
COMMITTEE:**

Prof. dr Todor Vasiljević, **Australija**, Prof. dr Ivan Krostev, **Bugarska**, Prof. dr Milovan Jotanović, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Miomir Pavlović, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Miladin Gligorić, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Jovan Đuković, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Radoslav Grujić, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Dragan Tošković, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Dragica Lazić, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Živan Živković, **Bosna i Hercegovina**, Akademik Dragoljub Mirjanić, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Siniša Moljević, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Ljiljana Vukić, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Jasmin Komić, **Bosna i Hercegovina**, Dr Dane Malešević, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Midhat Suljkanović, **Bosna i Hercegovina**, Prof. dr Mira Vukčević, **Crna Gora**, Prof. dr Darko Vuksanović, **Crna Gora**, Dr inž. Srećko Stopić, **Njemačka**, Prof. dr Milan Sak-Bosnar, **Hrvatska**, Prof. dr Gyuala Vatai, **Mađarska**, Prof. dr Svetozar Hadži Jordanov, **Macedonia**, Prof. dr Kiril Lisičkov, **Makedonija**, Prof. dr Vineta Srebrnkoska, **Makedonija**, Prof. dr Jurij Krobe, **Slovenija**, Prof. dr Andrzej Kowal, **Poljska**, Prof. dr Magdalena Parlinska-Wojtan, **Poljska**, Prof. dr Časlav Lačnjevac, **Srbija**, Prof. dr Milan Antonijević, **Srbija**, Prof. dr Đorđe Janačković, **Srbija**, Prof. dr Branko Bugarski, **Srbija**, Prof. dr Ivan Juranić, **Srbija**, Prof. dr Božo Dalmacija, **Srbija**, Prof. dr Sonja Đilas, **Srbija**, Dr Đorđe Okanović, **Srbija**

UREDNICI/EDITORIAL BOARD:

Prof. dr Miladin Gligorić
Doc. dr Aleksandar Došić
Doc. dr Dragan Vujadinović

TEHNIČKI UREDNICI/TECHNICAL EDITORS

Mr Mirjana Beribaka, Mr Danijela Rajić, Mr Marija Ridošić, Mr Stefan Pavlović

OBLAST/AREA:

ENGINEERING, ENVIRONMENT AND MATERIALS IN PROCESSING INDUSTRY
INŽENJERSTVO, EKOLOGIJA I MATERIJALI U PROCESNOJ INDUSTRIJI

GODINA IZDANJA/PUBLISHED: 2017.

ŠTAMPA/PRINT: Eurografika Zvornik

TIRAŽ/CIRCULATION: 200 primjeraka/copies

ISBN: 978-99955-81-21-3

**Autori snose punu odgovornost za originalnost i sadržaj sopstvenih radova
The authors have full responsibility for the originality and content of their own papers**



MATERIALS/MATERIJALI

M-11	<u>POLYMER COMPOSITE BASED OF TEXTILES IN VARIOUS GEOMETRY</u> <u>Silvana Zhezhova, Sanja Risteski, Vineta Srebrenkoska</u>	1091
M-12	<u>PONAŠANJE SADRŽAJA NATRIJUMA U HIDRATU I GLINICI U PROCESU PROIZVODNJE GLINICE “ALUMINA” PO BAYER-OVOM POSTUPKU</u> <u>Dragica Lazić, Dragana Kešelj, Dragana Blagojević, Radislav Filipović, Zoran Obrenović</u>	1099
M-13	<u>KARAKTERISTIKE ORGANSKIH BOJENIH PREVLAKA – EPOXY PRAJMER, CPW 714 I ALUMINIJUMSKI EPOXY EMAJL, CPW 715</u> <u>Božidarka Arsenović, Stana Stanišić, Ana Mičić</u>	1108
M-14	<u>KERAMIČKO-TEHNOLOŠKA SVOJSTVA GLINE BREZACI</u> <u>Leposava Filipović-Petrović, Dušan Stanojević, Mirjana Antonijević-Nikolić, Ljubica Mijić</u>	1116
M-15	<u>METODOLOGIJA ODREĐIVANJA POKAZATELJA PONAŠANJA HSLA ČELIKA PRI DELOVANJU NISKOCIKLIČNOG ZAMORA</u> <u>Vujadin Aleksić, Bojana Aleksić, Ljubica Milović</u>	1123
M-16	<u>ANALIZA OPRAVDANOSTI MODELIRANJA SUČEONO ZAVARENIH SPOJEVA KOD PRORAČUNA POSUDA POD PRITISKOM</u> <u>Bojana Aleksić, Vujadin Aleksić, Ljubica Milović</u>	1136
M-17	<u>TEXTILE MATERIALS USED IN MILITARY PROTECTIVE CLOTHES DESIGN</u> <u>Sanja Risteski, Silvana Zhezhova, Vineta Srebrenkoska</u>	1145
M-18	<u>INFLUENCE OF STEEL FIBER ON PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE</u> <u>Ksenija Janković, Marko Stojanović, Dragan Bojović, Ljiljana Lončar, Lana Antić</u>	1152
M-19	<u>MINERALOŠKA KARAKTERIZACIJA SIROVINA, MEĐUPROIZVODA I GOTOVOG PROIZVODA U FABRICI CEMENTA LUKAVAC</u> <u>Dragica Lazić, Dragana Kešelj, Mugdin Imamović, Mitar Perušić, Dijana Drljača</u>	1159
M-20	<u>SINERGISTIČKO DEJSTVO DVA AKTIVNA PUNILA NA SVOJSTVA ELASTOMERNIH MATERIJALA</u> <u>Vojislav Aleksić, Nada Lazić, Vojislav Jovanović, Jelena Pavličević, Zoran Petrović, Dejan Kojić, Jelena Tanasić, Jaroslava Budinski-Simendić</u>	1172
M-21	<u>KOROZIONA POSTOJANOST ELEKTROHEMIJSKI TALOŽENIH Zn-Mn PREVLAKA</u> <u>Marija Ridošić</u>	1182

METODOLOGIJA ODREĐIVANJA POKAZATELJA PONAŠANJA HSLA ČELIKA PRI DELOVANJU NISKOCIKLIČNOG ZAMORA

Vujadin Aleksić¹, Bojana Aleksić², Ljubica Milović³

¹Institut za ispitivanje materijala, IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija,
vujadin.aleksic@institutims.rs

²Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu d.o.o., Karnegijeva 4,
Beograd, Srbija, baleksic@tmf.bg.ac.rs

³Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija,
acibulj@tmf.bg.ac.rs

Izvod

U radu je analizirano eksperimentalno istraživanje ponašanja niskolegiranog čelika povišene čvrstoće (HSLA) u uslovima niskocikličnog zamora (LCF), sa kontrolisanom i potpuno reverzibilnom deformacijom ($\Delta\varepsilon/2 = \text{const}$, $R_\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max} = -1$). Ispitivanja niskocikličnog zamora obavljena su na seriji glatkih epruveta od čelika Nionikral 70 (NN-70), sa poluamplitudom kontrolisane deformacije, $\Delta\varepsilon/2=0.35, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70$ i 0.80 . Za izbor stabilizovanih histereza i obradu rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom, korišćene su preporuke standarda ISO 12106:2003 (E) i ASTM E 606-04, kao i dve nove metode: Metoda sredine stabilizacije (MSS) i Metoda praga NDT ($M_p\text{NDT}$), što u ovom radu predstavlja četiri rezultata za poređenje. Za svaki nivo deformacije izabrane su karakteristične stabilizovane histereze, određene prema preporuci standarda ISO 12106:2003 (E) i ASTM E 606-04, MSS i $M_p\text{NDT}$, sa kojih su očitani potrebni podaci za dalju obradu rezultata i konačno, konstruisanje karakterističnih krivih niskocikličnog zamora. Konstruisane krive su međusobno poređene, a ocenjen je uticaj izbora karakterističnih stabilizovanih histereza na karakterizaciju ponašanja čelika NN-70. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su nam dali važne podatke o razumevanju zamornog ponašanja čelika NN-70. U radu je izvršeno i poređenje rezultata statičkog i dinamičkog, odnosno monotonog i zamornog ponašanja materijala, što predstavlja praktični doprinos oceni ponašanja čelika NN-70 u uslovima delovanja niskocikličnog zamora.

Ključne riječi: HSLA, NN-70, LCF, ISO, ASTM, MSS, $M_p\text{NDT}$

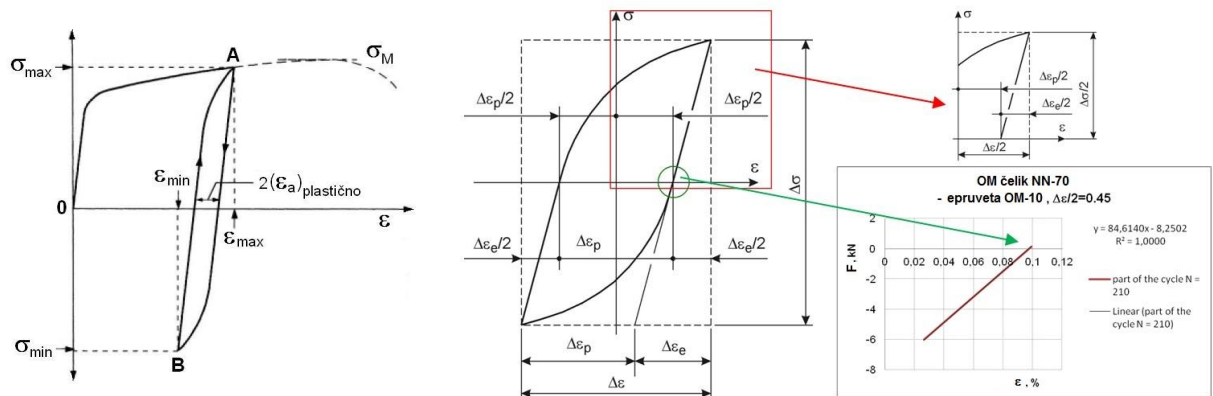
Uvod

Kod niskocikličnog zamora materijala, vrednosti promenljivog opterećenja, na kritičnim mestima, prekoračuju vrednost $R_{p0,2}$, odnosno počinje da se stvara plastično deformisana zona na tim mestima nakon relativno malog (niskog) broja ciklusa. Zamorni vek elemenata ovakvih čeličnih konstrukcija može se proceniti analizom ponašanja koja uključuje obradu podataka o opterećenju, geometriji i izabranom materijalu od kog je element ili konstrukcija izrađen. Veliki doprinos toj analizi daju pokazatelji ponašanja materijala pri delovanju niskocikličnog zamora, određeni ispitivanjem niskocikličnim zamorom. Čelik, NN-70, odabran u ovom radu za istraživanje eksperimentalnog ponašanja pri delovanju zamorajućeg opterećenja, između ostalog se primenjuju u brodogradnji kao i za izradu posuda pod pritiskom. Eksperiment je urađen na glatkim okruglim epruvetama osnovnog metala čelika NN-70. Kod izbora stabilizovane histereze, kao predstavnika svih stabilizovanih histereza za jedan nivo deformacije, a za dalju obradu rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom, korišćene su preporuke standarda [1, 2], a korišćena je i metodologija na osnovu koje je numerički utvrđena linearnost područja

stabilizacije niskocikličnog zamora [3]. Iz primenjene metodologije proizašle su i dve nove metode za određivanje karakteristične stabilizovane histereze, Metoda sredine stabilizacije (MSS) i Metoda praga NDT (MpNDT).

Ispitivanja niskocikličnim zamorom

Ponašanje materijala pri niskocikličnom zamoru ispituje se eksperimentalno, u skladu sa standardom ISO 12106:2003(E) (evropski) [1] i/ili ASTM E 606-04 (američki) [2]. 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 [4,5]. Naponsko-deformacioni odziv pri niskocikličnom zamoru oblika je idealizovane histerezisne petlje [4,5,6,7] prikazane na sl. 1. Raspon deformacija $\Delta\epsilon$ odgovara ukupnoj širini petlje, a raspon napona $\Delta\sigma$ odgovara njenoj ukupnoj visini. Amplituda napona jednaka je polurasponu napona, $\Delta\sigma/2$.



a) Naponsko deformaciona petlja ciklusa visoke amplitude napona nakon prve primene σ_{\max} [6]

b) Naponsko deformacioni odziv [4, 5]

c) Pozitivni deo petlje i određivanje

$$\Delta\epsilon_e/2 \text{ i } \Delta\epsilon_p/2 [3]$$

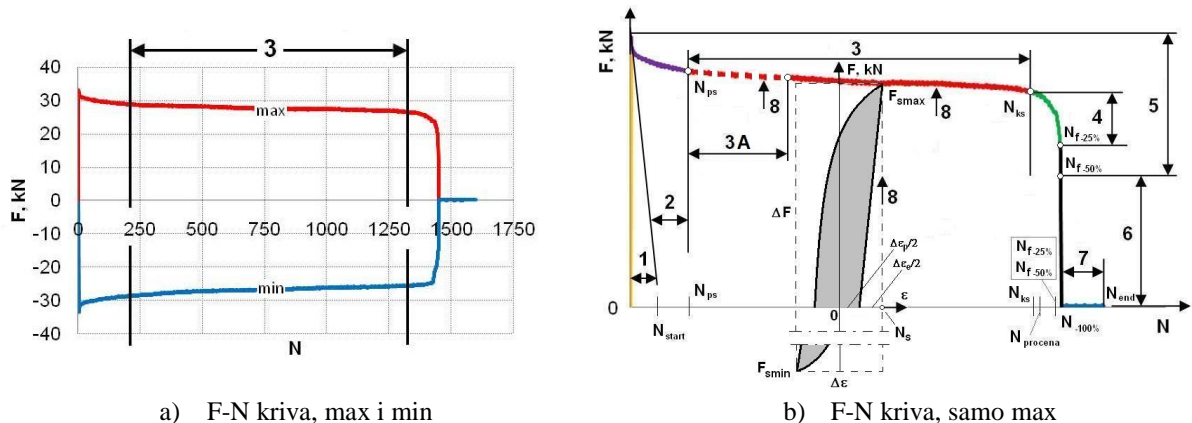
$$y = m \cdot x - b; F = m \cdot \epsilon - b; \text{ za } F = 0$$

$$\epsilon = b/m; \Delta\epsilon_p/2 = \epsilon;$$

$$\Delta\epsilon_e/2 = \Delta\epsilon/2 - \Delta\epsilon_p/2$$

Slika 1. Idealizovana histerezisna petlja

Većina materijala, pri niskocikličnom zamoru, na određenom nivou regulisane deformacije postiže takozvano stabilizovano stanje. To je stanje kada se visina histerezisne petlje izražena preko raspona sile opterećenja ili napona neznatno menja i zovemo ga oblast stabilizacije, 3 na sl. 2. Za analizu pri $R_\epsilon = -1$, dovoljno je da razmatramo pozitivni deo F-N krive, sl. 2b.



a) F-N kriva, max i min

b) F-N kriva, samo max

- 1 – Podešavanje kidalice; 2 – Prilagođavanje kidalice, alata i epruvete; 3 – **Stabilizovano stanje**; 3A – prag NDT; 4 – Pad sile od 25 % (ISO 12106:2003(E)) [1]; 5 – Pad sile od 50 % (ASTM E 606-04) [2]; 6 – Pad sile do $F=0$; 7 – Zaustavljanje kidalice; 8 – Visina histerezisne petlje;
- N_{start} - početak ispitivanja, $F = \max = F_{\max}$; N_{ps} - početak stabilizacije;
- N_{ks} - kraj stabilizacije; $N_{f,xx\%}$ - pad sile za xx %;
- N_{procena} - procena operatera za pad sile; N_{end} - kraj ispitivanja.
- A_0 - početni poprečni presek epruvete; A_{f1} - poprečni presek epruvete na kraju stabilizacije; A_{f2} - poprečni

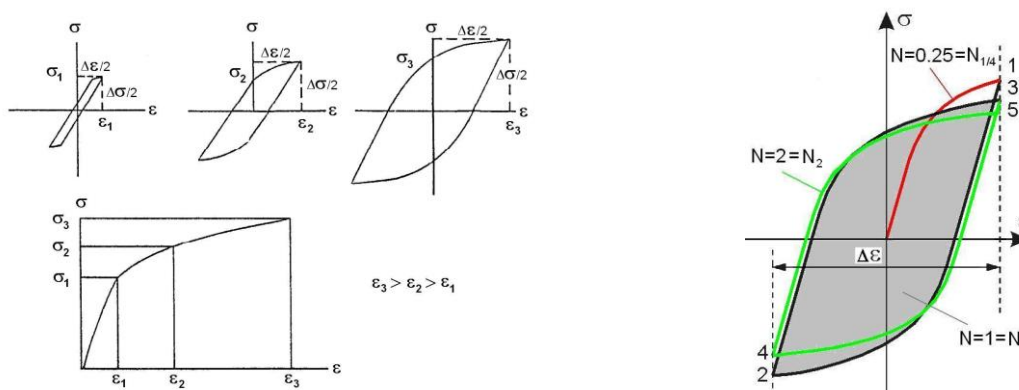
presek epruvete na pragu NDT;

Slika 2. Oblasti niskocikličnog zamora, OM, LCF, čelik NN-70, epruveta OM-10, $\Delta\varepsilon/2=0.45$

Histerezu za ciklus N_s u oblasti stabilizacije koji je blizak ili jednak polovini broja ciklusa do iniciranja prsline N_f , zovemo **stabilizovanom histerezom** [4,5,7,8,9]. Izbor stabilizovane histereze iz širokog spektra stabilizovanih histereza, koja na najbolji način karakteriše ponašanje materijala za određeni nivo deformacije veoma je važan. 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**.

Krajnji cilj ispitivanja LCF je konstruisanje karakterističnih krivih niskocikličnog zamora, koje se koriste u proračunima zamorne čvrstoće. U cilju definisanja i opisivanja procesa LCF 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.

Ciklična naponsko-deformaciona kriva (CNDK) predstavlja zavisnost amplitude napona $\Delta\sigma/2$ od amplitude ukupne deformacije $\Delta\varepsilon/2$, sl. 3. Za definisanje ove krive koriste se eksperimentalno određene stabilizovane histereze više nivoa regulisanih deformacija, sl. 3a.



a) histereze više određenih nivoa regulisane deformacije

b) brojanje histereza za određeni nivo regulisane deformacije, $\Delta\varepsilon=\text{const}$

Slika 3. Konstruisanje ciklične naponsko deformacione krive pomoću stabilizovanih histereza [10]

Jednačina Ciklične naponsko-deformacione krive ima oblik [4,5,7,11]:

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

gde su: K' - Koeficijent ciklične čvrstoće, n' - EkspONENT cikličnog deformacionog ojačavanja i E - modul elastičnosti određen iz ciklusa $N_{1/4}$, sl. 3b.

Jednačinu **Osnovne krive niskocikličnog zamora (OKNCZ)** [7,11] predstavlja izraz:

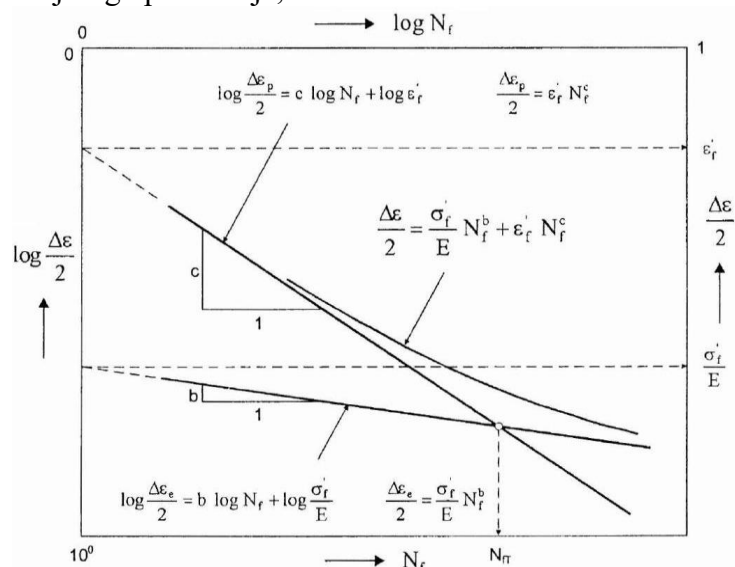
$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c \quad (2)$$

u kojoj su: $\Delta\varepsilon/2$ amplituda ukupne deformacije, $\Delta\sigma/2$ - amplituda napona pri čistom naizmenično promenljivom opterećenju, σ_f' - koeficijent zamorne čvrstoće, N_f - broj ciklusa do iniciranja prsline, b - eksponent zamorne čvrstoće, Basquin-ov eksponent, ε_f' - koeficijent zamorne duktilnosti i c - eksponent zamorne duktilnosti.

Na sl. 4 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 4 ilustruje i značenje eksponentata i koeficijenata potrebnih za definisanje osnovne krive niskocikličnog zamora (2).

Pomoću osnovne krive niskocikličnog zamora, poznate i kao kriva deformacija - vek, sl. 4, koja

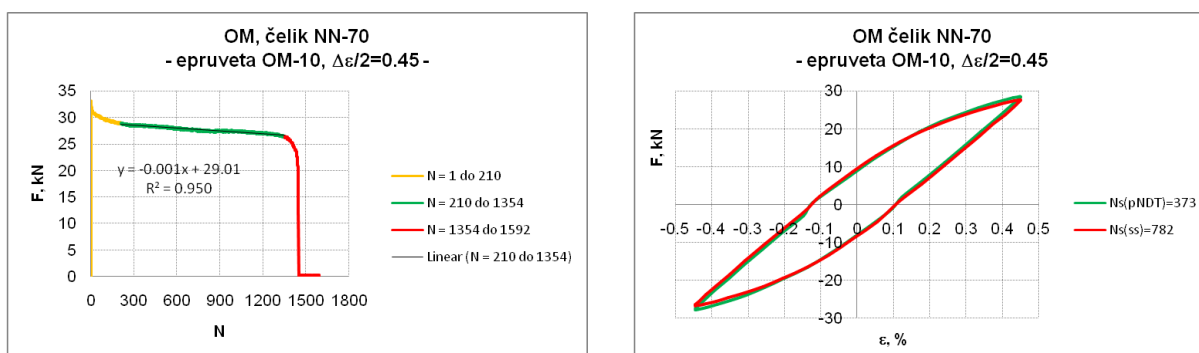
predstavlja zavisnost amplitude ukupne deformacije, $\Delta\epsilon/2$, od broja ciklusa do iniciranja prsline, N_f , može se tačno odrediti udeo plastične i elastične komponente materijala pri dejstvu niskocikličnog promenljivog opterećenja, sl. 4.



Slika 4. Kriva deformacija vek – određivanje prelaznog veka konstrukcije [4]

Presek krivih elastične i plastične komponente, sl. 4, označava prelaznu tačku odnosno prelazni vek, N_{fr} .

Najčešće metode ili načini za određivanje broja ciklusa do iniciranja prsline, N_f , su definisani standardima [1, 2]. Standard ISO 12106:2003 (E) [1] preporučuje da $N_{f(-25\%)}$ – ciklus iniciranja prsline, bude definisan padom zatezne sile opterećenja za 25% od završetka stabilizacije, a $N_{s1} = N_{s(-25\%)} = N_{f(-25\%)/2}$ – bude ciklus stabilizovane histereze, dok standard ASTM E 606-04 [2] preporučuje da $N_{f(-50\%)}$ – ciklus iniciranja prsline, bude definisan padom maksimalne zatezne sile opterećenja, F_{max} , za 50%, a $N_{s2} = N_{s(-50\%)} = N_{f(-50\%)/2}$ – bude ciklus stabilizovane histereze. Nove metode [3] za određivanje početka i kraja iniciranja prsline i uspostavljanja linearnosti područja stabilizacije bazirane su na eksperimentalnim podacima, tako što proizvoljno izaberemo tri ciklusa na osnovu koga uspostavimo linearnost koju održavamo filtriranjem podataka u programu EXCEL prema početku i kraju ispitivanja. Na taj način odredimo početni, N_{ps} , i krajnji, N_{ks} , ciklus stabilizacije, odnosno početak i kraj iniciranja prsline, sl. 5.



Slika 5. Područje stabilizacije, $N = 210$ do 1354 i stabilizovana histereza u ciklusima $N_{s(ss)}=782$ i $N_{s(pNDT)}=373$

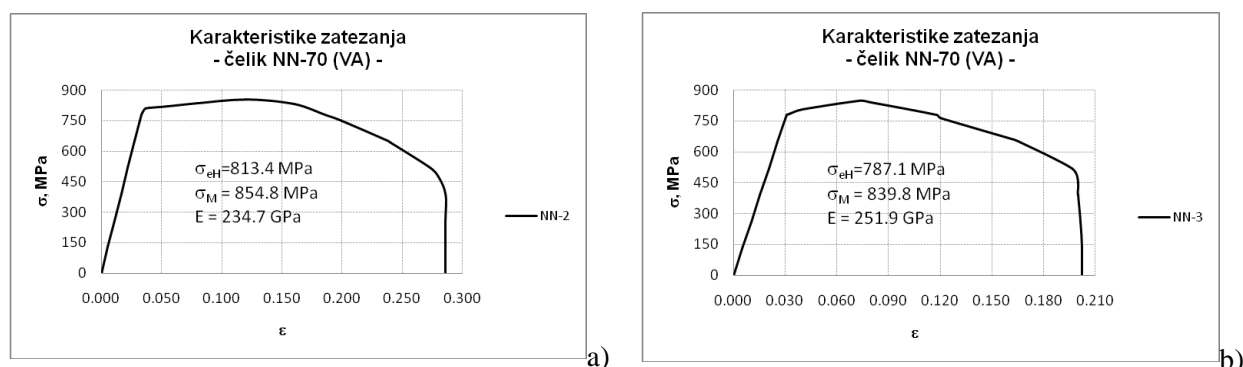
Stabilizovana histereza, $N_{s(ss)}$, se nalazi na polovini područja 3, sl. 2, i određuje se formulom, $N_{s3} = N_{s(ss)} = N_{ps} + (N_{ks} - N_{ps})/2$. Ovo je nova metoda određivanja stabilizovane histereze, $N_{s(ss)}$ koja je nazvana "Metoda sredine stabilizacije". Na sličan način možemo utvrditi ciklus pojave prsline površine 1 mm^2 , koju je moguće identifikovati metodama NDT, što je nazvano "Metoda praga NDT" [3], a nakon toga i ciklus stabilizovane histereze, $N_{s(pNDT)}$, koji se nalazi na polovini područja 3A, sl. 2, pa je $N_{s4} = N_{s(pNDT)} = N_{ps} + (N_{pNDT} - N_{ps})/2$. Ovaj postupak se primenjuje na sve

epruvete, odnosno sve nivoe deformacije, $\Delta\epsilon/2=0.35, 0.50, 0.60, 0.70$ i 0.80 , i posle obrade očitanih podataka sa svih određenih stabilizovanih histereza dobijenih opisanom metodologijom definišu se krive niskocikličnog zamora za određeni čelik.

Istorijat i karakteristike čelika NN-70

Čelik, NN-70 je jugoslovenska verzija američkog čelika HY-100 i namenjen je za izradu zavarivanjem: brodskih konstrukcija, podmornica i sudova pod pritiskom, pri čemu je zahtevana žilavost izuzetno važna. Tehnologija izrade i termomehanička obrada (TMCP čelici [12]) čelika, naziva Nionikral-70, rezultat je zajedničkog istraživačkog rada metalurga Vojno tehničkog instituta iz Žarkova (VTI) i Željezare "Jesenice" iz Jesenica [13], početkom 90-tih godina prošlog veka. 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 [14]. Prilikom određivanja analiznih granica ugljenika i ostalih legirajućih elemenata, imajući u vidu namenu čelika vodilo se računa da se postignu zahtevi za kombinaciju osobina kao što su čvrstoća, plastičnost, otpornost na stvaranje i širenje prslina, stabilnost ovih osobina na sniženim temperaturama, dobra otpornost na zamor i naponsku koroziju, dobru obradljivost i zavarljivost [14]. NN-70 namenjen je za oblikovanje zavarivanjem, pa je posle njegovog uspešnog osvajanja, ocenjena i njegova pogodnost za zavarivanje [13].

Osnovni materijal (OM) koji je poslužio za izradu epruveta za eksperiment je ploča, dimenzija $45 \times 205 \times 353$ mm, od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće, Nionikral 70 (NN-70), sa karakteristikama prikazanim na sl.6 i u tabelama 1 i 2.



Slika 6. Rezultati statičkog ispitivanja zateznih karakteristika OM čelika NN-70 [3]

Tabela 1. Hemijski sastav čelika NN-70, % mase [3]

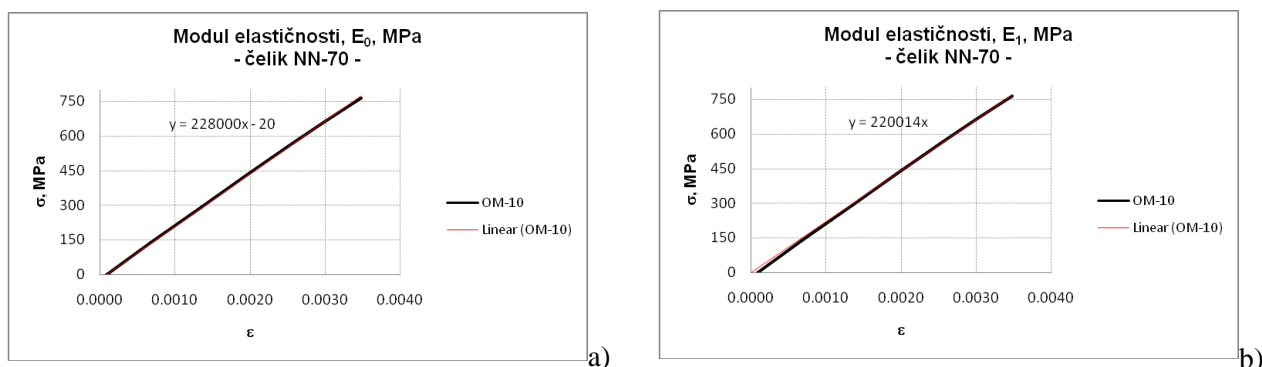
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	As	Sn
0.106	0.209	0.220	0.005	0.0172	1.2575	2.361	0.305	0.052	0.007	0.017	0.014
Cu	Ti	Nb	Ca	B	Pb	W	Sb	Ta	Co	N	
0.246	0.002	0.007	0.0003	0	0.0009	0.0109	0.007	0.0009	0.0189	0.0096	

Tabela 2. Mehaničke osobine čelika NN-70 [3]

Osobine	OM	
Zatezna čvrstoća, σ_M , MPa	854.8, sl. 6a	855 , zaokruženo
Napon tečenja, $\sigma_M, \sigma_{p0.2}$ MPa	813.4, sl. 6a	815 , zaokruženo
Modul elastičnosti, GPa	234.7, Statički, sl. 6a	221.4 , Dinamički, LCF, sl.7
Izduženje, A_5 , %	18.4	
Udarna žilavost, J	96.83, 20 °C	97 , zaokruženo, 20 °C
Energija stvaranja prslina, J	39.60, 20 °C	40 , zaokruženo, 20 °C
Energija širenja prslina, J	57.23, 20 °C	57 , zaokruženo, 20 °C
HV30	245-269, ploča OM	257 , srednja vrednost, ploča OM
HV10	252-262, štapić za LCF epruvetu [15]	257 , srednja vrednost, epruveta LCF

Postoje razne metode za određivanje modula elastičnosti za proračun zamora konstrukcionih elemenata, a izbor metode ne utiče značajno na krajnji rezultat proračuna [16]. Moduli elastičnosti u ovom radu, određeni su analitički za svaku epruvetu iz podataka o zateznom

ispitivanju ili ispitivanju NCZ iz ciklusa $N_{1/4}$, sl. 7, pa je izračunata srednja vrednost [3, 15].

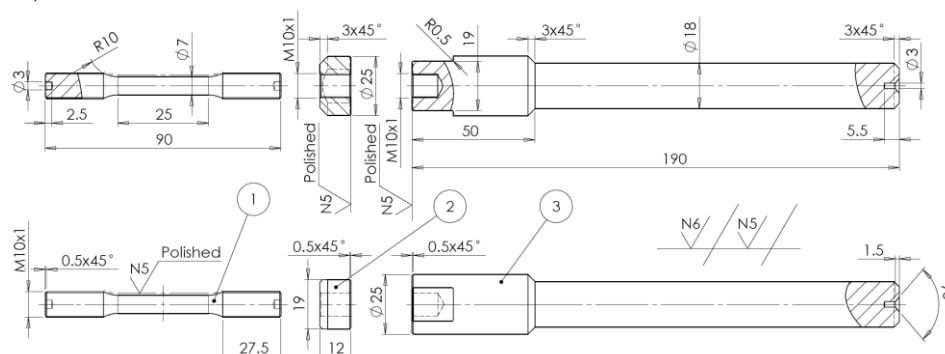


Amplitudni nivo deformacije $\Delta\epsilon/2=0.45$, Brzina opterećenja 330 MPa/sec

Slika 7. Dijagrami određivanja modula elastičnosti iz ciklusa $N_{1/4}$

Ispitivanje čelika NN-70 niskocikličnim zamorom

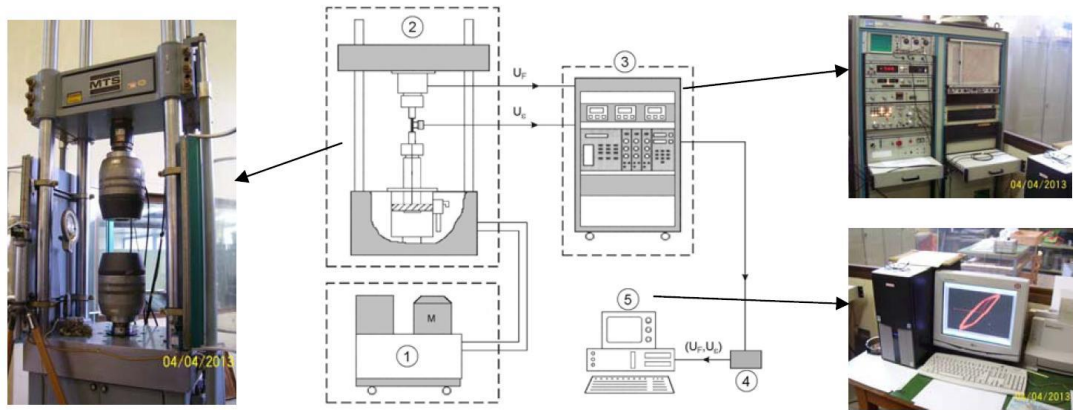
Iz potrebe da se izvrši procena niskocikličnog zamornog veka, u svrhu određivanja zamornih karakteristika materijala, provedeno je ispitivanje otpornosti na niskociklični zamor osnovnog materijala (OM) čelika NN-70. Priprema ispitivanja otpornosti na niskociklični zamor čelika NN-70, sastojala se od izrade cilindričnih glatkih epruveta, sl. 8, poz.1, izrade alata za stavljanje epruvete u čeljusti kidalice, sl. 8, poz. 2 i 3, i provere ciljnih statičkih zateznih karakteristika čelika NN -70, sl. 6 i tabela 2.



poz.1, Epruveta za LCF, NN-70, D=7 mm; Poz.2, Kontra navrtka; Poz. 3, Držač epruvete, 42CrMo4;

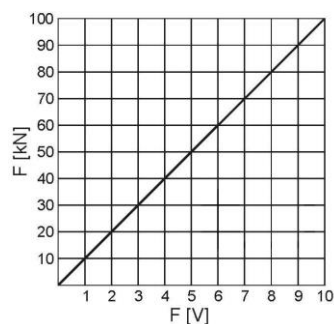
Slika 8. Epruveta i držač epruvete za ispitivanje NCZ čelika NN-70 [3]

Postupak određivanja karakteristika niskocikličnog zamora, kao i geometrija cilindrične glatke epruvete, sl. 8, poz.1, definisani su standardima ISO 12106:2003(E) [1] i ASTM E 606-04^e [2]. Ispitivanje zamoranjem izvedeno je na univerzalnom MTS sistemu (Material Testing System – Univerzalna hidraulična dinamička kidalica od 500 kN) za ispitivanje materijala, prikazanom šematski sa fotografijama na sl. 9.

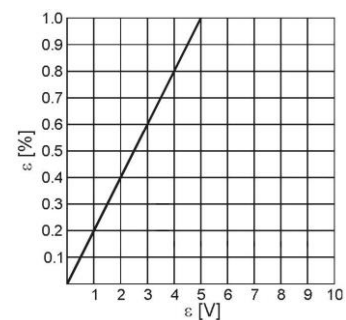


Slika 9. MTS univerzalni sistem za ispitivanje materijala, 1 – Hidraulični agregat, 2 – Pulzator, 3 – Kontrolni sistem, 4 – A/D konvertor, 5 – PC.

Linearne karakteristike korišćenog MTS davača sile, sl. 9a, i MTS ekstenzometra merne dužine $L_0 = 25$ mm, sl. 9b grafički su predstavljene na sl. 9.



a) MTS davač sile, $F[\text{kN}] = F[\text{V}] \cdot 10$



b) MTS ekstenzometar, $\varepsilon[\%] = \varepsilon[\text{V}] \cdot 0.2$

Slika 9. Linearne karakteristike MTS davača sile i MTS ekstenzometra

Ispitivanja niskocikličnim zamorom obavljena su na seriji glatkih epruveta od čelika NN-70, sa poluamplitudama kontrolisanih i potpuno reverzibilnih deformacija, $\Delta\varepsilon/2=0.35, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70$ i 0.80 ($\Delta\varepsilon/2 = \text{const}$, $R_\varepsilon = \varepsilon_{\text{min}}/\varepsilon_{\text{max}} = -1$).

Obrada i prezentacija rezultata ispitivanja

Kao rezultat ispitivanja niskocikličnim zamorom na jednoj epruveti (jednom amplitudnom nivou deformacije) je zapis u EXCEL-u, sl. 10, koji se upotrebom dostupnih alata u EXCEL-u može dalje obrađivati prema našim zahtevima [3].

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 10. Zapis u EXCEL-u posle ispitivanja niskocikličnim zamorom na jednoj epruveti [3]

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 izvršene su sledeće analize rezultata ispitivanja niskocikličnim zamorom:

1. Određeni su moduli elastičnosti iz ciklusa $N_{1/4}$, sl. 3b i 7.
2. Za svaki amplitudni nivo deformacije (svaku epruvetu) filtriranjem podataka uparene su ekstremne vrednosti sile opterećenja i broja ciklusa, i na taj način smo se rešili viška podataka, sl. 2a. Urađeno je filtriranje za pozitivne i negativne vrednosti sile opterećenja.
3. Nacrtani su dijagrami ekstremnih vrednosti sile opterećenja i broja ciklusa (F-N krive) za svaki amplitudni nivo deformacije, sl. 2a.
4. Nacrtani su dijagrami određivanja područja stabilizacije (pozitivni deo F-N krivih, područje stabilizacije je određeno linearizacijom podataka maksimalnih zateznih sile opterećenja kod ispitivanja niskocikličnim zamorom za svaki amplitudni nivo deformacije, sl. 2b). Određene su oblasti niskocikličnog zamora i karakteristične histereze posle:
 - a. Određivanja maksimalne sile i ciklusa N_{start} , sl. 2b,
 - b. Određivanja ciklusa N_{ps} i N_{ks} i oblasti stabilizacije, sl. 2b,
 - c. Određivanja ciklusa $N_{f(-25\%)}$, sl. 2b,
 - d. Određivanja ciklusa $N_{f(-50\%)}$, sl. 2b,
 - e. Određivanja ciklusa $N_{(-100\%)}$ i N_{end} , sl. 2b.
5. Određeni su karakteristični podaci stabilizovanih histerezisnih krivih za svaki amplitudni nivo deformacije:
 - a. Očitane su ekstremne vrednosti sile opterećenja F_{smax} i F_{smin} , sl. 2b.
 - b. Utvrđena su mesta preseka histerezisne krive i pozitivnog dela ose deformacije u EXCELU (određeni su koeficijenti prave, m i b), sl. 1c. Ovo se može uraditi i grafički [15] u nekom od programa za precizno crtanje (Corel, AutoCad, SolidWorks i dr.).
 - c. Izračunate su vrednosti $\Delta\epsilon_p/2$, $\Delta\epsilon_s/2$, $A_0=D^2 \cdot \pi/4$, $F_{sr}=(|F_{smax}| + |F_{smin}|)/2$ i $\Delta\sigma/2=F_{sr}/A_0 \cdot 1000$.
6. Grupisani su podaci za sve amplitudne nivo deformacije, konstruisane su Ciklične naponsko deformacione krive i Osnovne krive niskocikličnog zamora i urađeno poređenje Ciklične i Monotone naponsko deformacione krive [17, 18]:
 - a. Određeni su eksponenti i koeficijenti pomoću linearizovane stepene funkcije, n' i K', tab.3.

- b. Određeni su eksponenta i koeficijenta pomoću linearizovane elastične komponente, b i σ'_f , tab.4.
- c. Određeni su eksponenti i koeficijenti linearizovane plastične komponente, c i ε'_f , tab.5.
7. Grupisani su podaci Ciklično naponsko deformacionih krivih i Osnovnih krivih niskocikličnog zamora za grupu odabranih stabilizovanih histereza, N_{s1} , N_{s2} , N_{s3} , N_{s4} radi njihovog konstruisanja i poređenja i konačno,
8. Određen je prelazni vek za grupu odabranih stabilizovanih histereza, N_{s1} , N_{s2} , N_{s3} , N_{s4} , tab. 6.

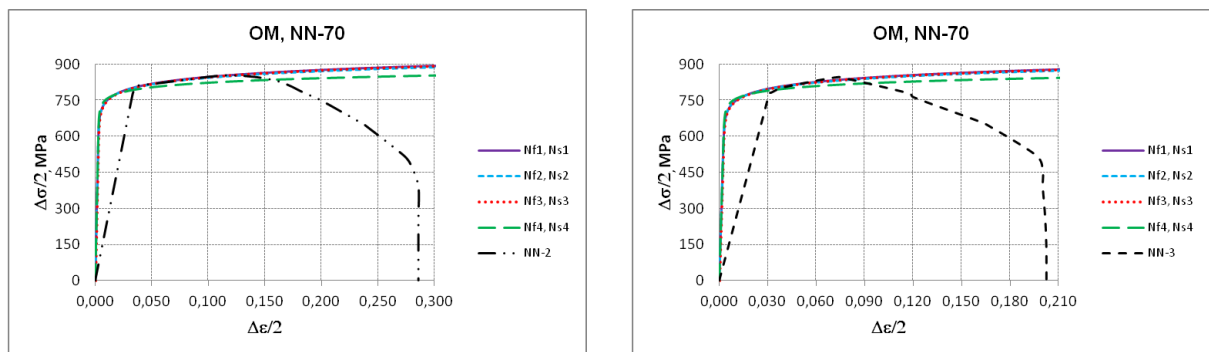
Analiza i poređenje rezultata

U tabeli 3 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 0.032 do 0.047, a koeficijent K' u intervalu 887.2 do 946.2 MPa, s tim što standard ISO 12106:2003 (E) i metoda MSS daju iste rezultate.

Tabela 3. Eksponenti n' i koeficijenti K' cikličnih naponsko deformacionih krivih

OM			n'	log K'	K' , MPa
NN-70	N_f	N_s			
ISO 12106:2003 (E)	$N_{f(-25\%)}=N_{f1}$	N_{s1}	0.047	2.976	946.2
ASTM E 606-04	$N_{f(-50\%)}=N_{f2}$	N_{s2}	0.045	2.972	937.6
MSS	$N_{ks}=N_{f3}$	N_{s3}	0.047	2.976	946.2
MpNDT	$N_{pNDT}=N_{f4}$	N_{s4}	0.032	2.948	887.2
Linearizovana stepena funkcija			$\log \frac{\Delta\sigma}{2} = n' \log \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \log K'$		
Ciklična naponsko deformaciona kriva			$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$		

Na sl. 11 prikazano je poređenje Cikličnih i Monotonih naponsko deformacionih krivih, na kojima se vidi dobro poklapanje ovih krivih dobijenih izborom ciklusa N_{f1} , N_{f2} i N_{f3} kao reprezentativnih kod LCF ispitivanja, tj. OM čelika NN-70 u ovim uslovima niskocikličnog zamora niti slabi, niti ojačava, dok za N_{f4} , čelik NN-70 u uslovima niskocikličnog zamora slabi.



Slika 11. Poređenje cikličnih i monotonih naponsko deformacionih krivih OM NN-70

U tabeli 4 prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti elastične komponente amplitude ukupne deformacije 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 0.065, a koeficijent σ'_f u intervalu 1130.1 do 1153.8 MPa.

Tabela 4. EkspONENTI **b** i koeficijenti σ'_f elastične komponente osnovnih krivih NCZ

OM						E_{sr0} , MPa	E_{sr1} , MPa	$E=E_{sr}$, MPa
NN-70						223328	219427	221378
	N_f	N_s	b	$\log \frac{\sigma'_f}{E_{sr}}$	σ'_f/E_{sr}	σ'_{f0}	σ'_{f1}	σ'_f
ISO 12106:2003 (E)	$N_{f(-25\%)}=N_{f1}$	N_{s1}	-0.060	-2.283	0.0052	1164.0	1143.6	1153.8
ASTM E 606-04	$N_{f(-50\%)}=N_{f2}$	N_{s2}	-0.057	-2.291	0.0051	1142.7	1122.8	1132.7
MSS	$N_{ks}=N_{f3}$	N_{s3}	-0.061	-2.292	0.0051	1140.1	1120.2	1130.1
MpNDT	$N_{pNDT}=N_{f4}$	N_{s4}	-0.065	-2.291	0.0051	1142.7	1122.8	1132.7
Linearizovani deo elastične komponente			$\log \frac{\Delta \epsilon_c}{2} = b \log N_f + \log \frac{\sigma'_f}{E}$					
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \epsilon'_f N_f^c$					

U tabeli 5 prikazani su grupisani eksponenti i koeficijenti plastične komponente amplitude ukupne deformacije 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 -0.695, a koeficijent ϵ'_f u intervalu 0.0612 do 0.1250.

Tabela 5. EkspONENTI **c** i koeficijenti ϵ'_f plastične komponente osnovnih krivih NCZ

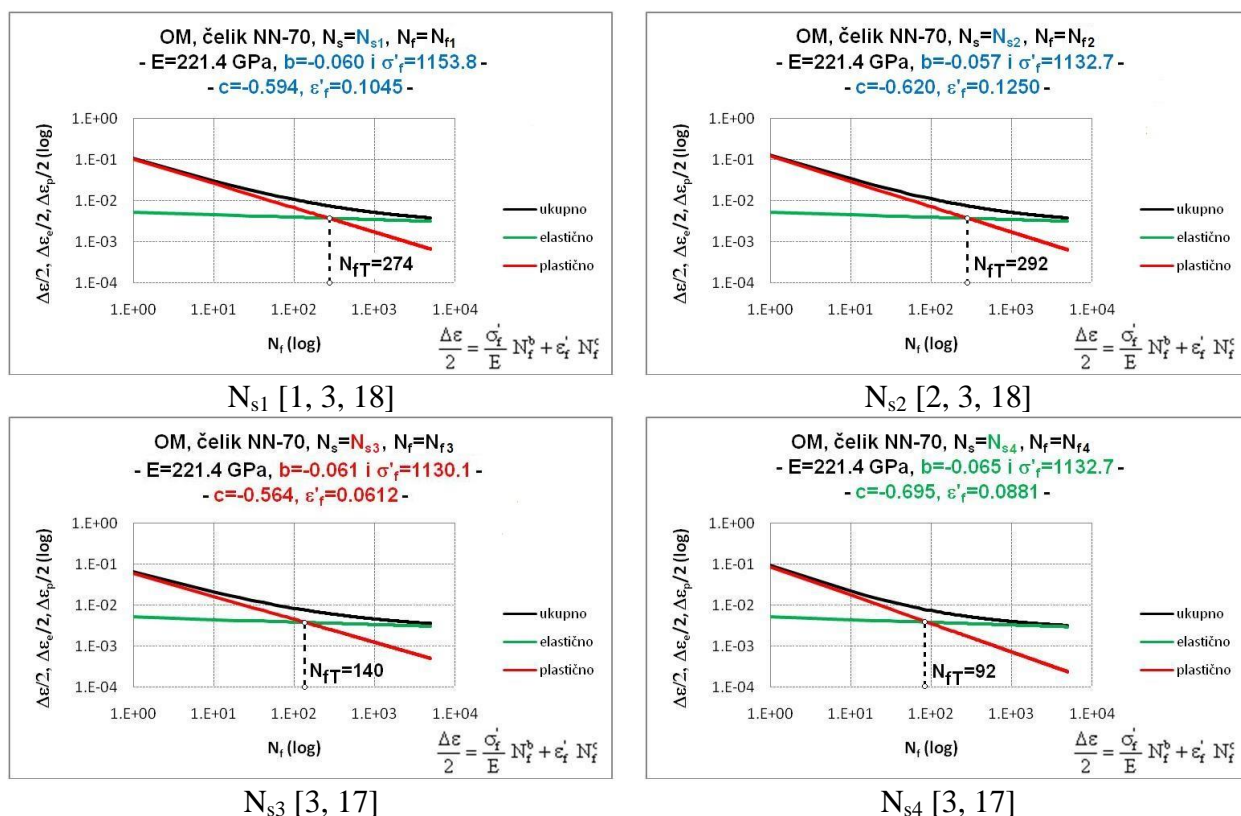
OM			c	$\log \epsilon'_f$	ϵ'_f
NN-70	N_f	N_s			
ISO 12106:2003 (E)	$N_{f(-25\%)}=N_{f1}$	N_{s1}	-0.594	-0.981	0.1045
ASTM E 606-04	$N_{f(-50\%)}=N_{f2}$	N_{s2}	-0.620	-0.903	0.1250
MSS	$N_{ks}=N_{f3}$	N_{s3}	-0.564	-1.213	0.0612
MpNDT	$N_{pNDT}=N_{f4}$	N_{s4}	-0.695	-1.055	0.0881
Linearizovani deo plastične komponente			$\log \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = c \log N_f + \log \epsilon'_f$		
Osnovna kriva niskocikličnog zamora			$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \epsilon'_f N_f^c$		

U tabeli 6 izračunat je prelazni vek za čelik NN-70, na osnovu parametara određenih prema standardima [1, 2] i novim metodama za određivanje stabilizovane histereze [3]. Prelazni vek, N_{FT} , za OM čelika NN-70 kreće se u intervalu 92 do 292, tj. prelazni vek određen prema MpNDT [3] je za 3.17 puta manji u odnosu na prelazni vek izračunat na osnovu metodologije određivanja stabilizovane histereze prema metodi standarda ASTM E 606-04, što ovu metodu čini konzervativnijom.

Tabela 6. Prelazni vek OM čelika NN-70

OM	E, MPa	221378	elastični deo		plastični deo		
NN-70	N_f	N_s	b	σ'_f	c	ϵ'_f	N_{FT}
ISO 12106:2003 (E)	$N_{f(-25\%)}=N_{f1}$	N_{s1}	-0.06	1153.8	-0.594	0.1045	274
ASTM E 606-04	$N_{f(-50\%)}=N_{f2}$	N_{s2}	-0.057	1132.7	-0.62	0.125	292
MSS	$N_{ks}=N_{f3}$	N_{s3}	-0.061	1130.1	-0.564	0.0612	<u>140</u>
MpNDT	$N_{pNDT}=N_{f4}$	N_{s4}	-0.065	1132.7	-0.695	0.0881	<u>92</u>
Prelazni vek			$N_{FT} = \left(\frac{\epsilon'_f \cdot E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}}$				

Na sl. 12 (za N_{s1} [1,3,18], N_{s2} [2,3,18], N_{s3} i N_{s4} [3,17]) prikazane su OKNCZ definisane preko odgovarajućih stabilizovanih histreza, sa određenim prelaznim vekom, N_{fT} .



Slika 12. OKNCZ, OM NN-70 sa prikazanim prelaznim vekom, N_{fT}

Zaključci

Teorijska, eksperimentalna i numerička istraživanja problematike ponašanja niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u uslovima opterećenja niskocikličnim zamorom 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 predstavljaju značajan deo ovog rada. Detaljnom analizom istorijskog pregleda istraživanja u ovoj oblasti, kao i analizom najnovijih publikovanih rezultata, napravljena je baza za dalja istraživanja u oblasti niskocikličnog zamora. Jedan od ciljeva istraživanja se nametnuo 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 pri delovanju niskocikličnog opterećenja.

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.

Iz određenih karakterističnih stabilizovanih histreza na osnovu zadatih kriterijuma prikupljeni su podaci potrebni za određivanje jednačina karakterističnih krivih niskocikličnog zamora iz kojih se vidi razlika vrednosti eksponenta i koeficijenta određenih prikazanom metodologijom u zavisnosti od primenjenog standarda, odnosno metode za određivanje stabilizovane histereze.

Nova metodologija za određivanje područja stabilizovanih histreza i mogućnost izbora stabilizovane histereze za zadati kriterijum otvara 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 prsline, 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.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su nam dali važne podatke o razumevanju zamornog ponašanja HSLA čelika, a novo primenjene metode, kao i preporuke standarda omogućile su precizno određivanje karakterističnih stabilizovanih histereza za svaki nivo deformacije.

Dobijeni rezultati predstavljaju praktičan doprinos oceni ponašanja niskolegiranog čelika povišene čvrstoće NN-70 u uslovima delovanja niskocikličnog zamora.

Literatura

- [1] ISO 12106:2003(E). Metallic materials-fatigue testing-axial-strain-controlled method, Geneva: ISO 2003, Switzerland.
- [2] ASTM E606-80. (1985). Standard Recommended Practice for Constant Amplitude Low Cycle Fatigue Testing, ASTM Designation E606-80, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, pp 681.
- [3] Vujadin, A. (2016). Niskociklični zamor niskolegiranih čelika povišene čvrstoće, Radna verzija prijavljene doktorske disertacije, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2016.
- [4] Posavljak, S. (1999). Naponsko-deformaciona analiza i zamor materijala rotacionih diskova turbomlaznih motora, Magistrski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [5] Posavljak, S. (2008). Istraživanje zamornog veka rotacionih diskova avionskih motora, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [6] Schijve, J. (2001). *Fatigue of Structures and Materials*. Dordrecht, Boston, MA: Kluwer Academic.
- [7] Bannantine, J. A., Comer, J., Handrock, J. (1990). *Fundamentals of Material Fatigue Analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall
- [8] Janković, D. M. (2001). *Malociklusni zamor*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [9] Janković, D. M. (1988) Eksperimentalno određivanje tokova zamaranja materijala pri ciklično promenljivim elasto-plastičnim deformacijama, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] Socie, D. F., Mitchell, M. R., Caulfield, E. M. (1978). *Fundamentals of modern fatigue analysis*. Department of Theoretical and Applied Mechanics, College of Engineering, University of Illinois, Urbana, USA.
- [11] Kostaes, D. (1994). Fatigue Behaviour and Analysis, Talat Lecture 2401. Technische Universität München, EAA – European Aluminium Association.
- [12] Radović, N., & Drobñjak, Đ. (2001). Razvoj čelika za izradu zavarenih konstrukcija povišene sigurnosti. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 46(3), 81-92.
- [13] Grabulov, V. (1986). Prilog definisanju uticaja hemijskog sastava i debljine lima na pojavu prskotina u zavarenim spojevima čelika Nionikral - 70, Magistrski rad, Tehnološko – metalurški fakultet, Univerziteta u Beogradu.
- [14] Radović, A., & Marković, D. (1984). *Osvajanje brodograđevnog čelika povišene čvrstoće - NIONIKRAL-70*. VTI, Beograd.
- [15] Bulatović, S. (2014). Elasto-plastično ponašanje zavarenog spoja od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće u uslovima niskocikličnog zamora. Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu.
- [16] Boronski, D. (2004). The effect of the method of determination of Young's modulus on the estimation of fatigue life of structural elements. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 42(2), 269–283.
- [17] Aleksić, V., Aleksić, B., Milović, Lj. (2016). Methodology for determining the region of stabilization of low-cycle fatigue. *Book of Abstracts, 16th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture (NT2F16)*, Dubrovnik, Croatia, 189 – 190.

[18] Aleksić, V., Milović, Lj., Aleksić, B., Abubkr, M. H. (2016). Indicators of HSLA steel behavior under low cycle fatigue loading, 21st European Conference on Fracture, ECF21, Catania, Italy. *Procedia Structural Integrity* 2, 3313–3321.

METHODOLOGY FOR DETERMINING INDICATORS OF HSLA STEEL BEHAVIOR UNDER LOW CYCLE FATIGUE LOADING

Vujadin Aleksić¹, Bojana Aleksić², Ljubica Milović³

¹*Institute for testing of materials-IMS Institute, Bulevar vojvode Mišića 43, Belgrade, Serbia*

²*Innovation Centre, Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade, Serbia*

³*University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade, Serbia*

Abstract

In present paper, the behaviour of high-strength low-alloyed (HSLA) steel under conditions of low-cycle fatigue (LCF) has been experimentally tested and analyzed. Based on the experimental results obtained in the programme EXCEL, characteristic regions of low-cycle fatigue of steel NIONIKRAL 70 (NN-70) have been determined, the most important being the region of stable behaviour of materials, so-called "the region of stabilization". From this region, on the basis of pre-defined requirements, characteristic stabilized hysteresis have been isolated for each strain level, based on which the indicators of low-cycle fatigue of steel NN-70 have been identified.

Key words: *HSLA, NN-70, LCF, ISO, ASTM, MSS, MpNDT*

Acknowledgements

This work is a contribution to the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia funded Project TR 35011.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

66.02-9(082)(0.034.2)
54(082)(0.034.2)
502/504(082)(0.034.2)

МЕЂУНАРОДНИ конгрес "Инжењерство, екологија и материјали у процесној индустрији" (5 ; 2017 ; Јахорина)
Zbornik radova [Електронски извор] = Proceedings / V međunarodni kongres "Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji", Jahorina, 15.03.- 17.03. 2017. = V International Congress "Engineering, Ecology and Materials in the Processing Industry" ; [urednici Miladin Gligorić, Aleksandar Došić, Dragan Vujadinović]. - Zvornik : Tehnološki fakultet, 2017 (Zvornik : Eurografika). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) : tekst, ilustr. ; 12 cm

Sistemska zahtevi nisu navedeni. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 200. - Bibliografija uz sve radove. - Abstract. - Registar.

ISBN 978-99955-81-21-3
1. Технолошки факултет (Зворник)

COBISS.RS-ID 6384152



UNIVERSITY
OF EAST
SARAJEVO



FACULTY OF
TECHNOLOGY
ZVORNIK

www.tfzv.org